HAL
open science

CONCEPTION D'UN INSTRUMENTARIUM POUR LA CREATION MUSICALE A L'AIDE DES MODELES PHYSIQUES CORDIS-ANIMA

Olivier Tache

To cite this version:

Olivier Tache. CONCEPTION D'UN INSTRUMENTARIUM POUR LA CREATION MUSICALE A L'AIDE DES MODELES PHYSIQUES CORDIS-ANIMA. Modélisation et simulation. Institut Polytechnique de Grenoble, 2008. Français. NNT : . tel-01102337

HAL Id: tel-01102337

https://hal.science/tel-01102337

Submitted on 12 Jan 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INSTITUT POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

N° attribué par la bibliothèque
|__|__|__|__|__|__|__|__|__|__|

T H E S E

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'Institut polytechnique de Grenoble

Spécialité : *« Ingénierie de la cognition, de l'interaction, de l'apprentissage et de la création »*

préparée au laboratoire Informatique et Création Artistique

dans le cadre de **l'Ecole Doctorale** *« Ingénierie pour la Santé, la Cognition et l'Environnement »*

présentée et soutenue publiquement

par

Olivier TACHE

Le 10 octobre 2008

CONCEPTION D'UN INSTRUMENTARIUM POUR LA CREATION MUSICALE A L'AIDE DES MODELES PHYSIQUES CORDIS-ANIMA

DIRECTEUR DE THESE
M. Claude Cadoz

JURY

M. Jean-Claude Risset,	Président
M. Carlos Agon,	Rapporteur
M. David L. Wessel,	Rapporteur
M. Claude Cadoz,	Directeur de thèse
Mme. Nadine Guillemot,	Examinatrice
M. Giovanni De Poli,	Examinateur

Résumé

CORDIS-ANIMA est un système développé par l'ACROE (Association pour la Création et la Recherche sur les Outils d'Expression) permettant de construire des objets physiques virtuels et d'en simuler les mouvements. Ces *modèles physiques* sont composés de modules élémentaires dont le comportement est comparable à celui d'objets ou d'interactions physiques simples, intimement liés à la dynamique newtonienne. CORDIS-ANIMA est mis en œuvre dans un environnement informatique de création musicale, GENESIS, qui permet aussi bien d'aborder la synthèse de sons que la composition de structures musicales complexes, avec une grande diversité de résultats démontrée par la réalisation de plusieurs milliers de modèles et la productions de nombreuses pièces musicales.

L'une des propriétés remarquables de CORDIS-ANIMA est de faire appel à un nombre très restreint de modules élémentaires par rapport à ce que l'on observe pour la majorité des environnements modulaires musicaux. Cette extrême modularité, garante de la généralité du formalisme, a cependant un coût pour l'utilisateur. Elle implique une approche de « bas niveau », dans la mesure où la création de modèles est réalisée par assemblage d'éléments très simples. Les comportements complexes, susceptibles d'entrer dans le champ musical, émergent alors de l'organisation précise de centaines ou de milliers de modules en interaction. Le travail de création musicale avec CORDIS-ANIMA s'appuyant sur une maîtrise solide des niveaux élémentaires, suppose la structuration des parties d'un modèle à différents niveaux de complexité permettant l'articulation du propos musical.

Dans cette thèse, principalement réalisée dans le cadre de l'environnement GENESIS, nous proposons une organisation conceptuelle générale des modèles CORDIS-ANIMA pour la création musicale, visant à faciliter l'apprentissage et l'utilisation de cette méthode et, en quelque sorte, à en constituer le « langage ». Suite à une analyse d'un corpus de plusieurs milliers de modèles, nous identifions les *fonctions* élémentaires qui doivent ou peuvent être réalisées dans un modèle, et étudions leur composition en vue de la production de comportements complexes. Nous étudions par ailleurs les différents types de composants et de techniques de modélisation permettant de réaliser ces fonctions. Ce travail, qui nous a amené à inventorier et classifier plus d'une centaine d'éléments caractéristiques de la modélisation dans GENESIS, nous permet de jeter les bases d'un *Instrumentarium* pour la création musicale avec CORDIS-ANIMA, c'est-à-dire d'une organisation structurée et consistante de l'ensemble des possibilités offertes en ce domaine par le formalisme. Cet Instrumentarium est appelé à former le cœur de l'environnement didactique accompagnant la diffusion de GENESIS.

Mots clés : Informatique musicale, modélisation physique, CORDIS-ANIMA, synthèse sonore, composition assistée par ordinateur, création musicale, instrumentarium.

Abstract

CORDIS-ANIMA is a system developed by ACROE (Association pour la Création et la Recherche sur les Outils d'Expression) allowing to build virtual physical objects and to simulate their movements. These *physical models* are composed of elementary modules whose behavior is similar to that of simple physical objects or interactions. CORDIS-ANIMA is implemented in the GENESIS computer music environment, which addresses sound synthesis as well as the composition of complex musical structures. The results obtained with GENESIS cover a very large area, as demonstrated by the thousands of existing models and the many musical pieces that have been realized so far using this environment.

One of the remarkable properties of CORDIS-ANIMA is that it uses a very small number of elementary modules compared to most of modular computer music environments. This extreme modularity ensures the generality of the formalism, but it has a cost for the user. It implies a "low level" approach, since models are created by assembling very simple elements. Complex behaviours that are relevant to the musical domain emerge from the precise organisation of thousands or hundreds of interacting modules. Therefore, musical creation with CORDIS-ANIMA requires to master the elementary physical level and to structure the parts of a model into different levels of increasing complexity in order to articulate the musical ideas.

In this thesis, which has been mainly realized within GENESIS, we propose a general conceptual organisation of CORDIS-ANIMA models for musical creation that aims at supporting the learning process and, to a certain extent, at constituting its "language". After studying a corpus of several thousands of models, we identify the elementary *functions* that may or have to be performed in a model and describe how they can be composed together in order to obtain complex behaviours. Moreover, we study the different types of components and modelling techniques that allow performing these functions. This work, which led us to the identification and classification of more than a hundred elements that characterize physical modelling using GENESIS, enables us to define the basis of an *Instrumentarium* for musical creation with CORDIS-ANIMA, i.e. a structured and consistent organisation of all the possibilities offered by the formalism within this domain. This Instrumentarium is destined to be the core of the learning environment that will be available with the next versions of GENESIS.

Keywords : Computer music, physical modelling, CORDIS-ANIMA, sound synthesis, computer-assisted composition, music creation, instrumentarium.

Remerciements

Mes premiers remerciements vont au directeur de cette thèse, Claude Cadoz : pour son écoute attentive et sa compréhension, ses conseils avisés et ses remarques allant droit au cœur des choses ; pour l'attention continue portée à l'avancée de mes travaux et la confiance qu'il a su me transmettre quant à leur bon déroulement dans les moments délicats ; pour l'enthousiasme qu'il m'a souvent communiqué lors de nos conversations, qu'elles touchent à l'informatique musicale ou à tant d'autres domaines.

Je souhaite également remercier tous les membres de l'ACROE et du Laboratoire ICA, à commencer par Jean-Loup Florens et Annie Luciani, qui sont, avec Claude Cadoz, les auteurs d'un cadre scientifique et artistique, à la fois conceptuel et pratique, qui m'a inlassablement stimulé pendant les quatre années de ce doctorat et m'a poussé à reconsidérer en profondeur ma conception de la création artistique en général et particulièrement de l'utilisation des nouvelles technologies. Je leur en suis redevable aussi bien au niveau scientifique qu'en tant que musicien.

Parmi tous les membres de l'équipe, je tiens tout particulièrement à dire un grand merci à :

Nicolas Castagné, pour ses encouragements perpétuels, ses conseils, et pour le plaisir que j'ai eu à travailler avec lui à de multiples reprises, qu'il s'agisse de préparer un cours ou de réaliser la mise en page d'un livre à une heure avancée de la nuit.

Alexandros Kontogeorgakopoulos et François Poyer, pour les échanges nombreux et enrichissants que nous avons eus à propos de la création musicale avec CORDIS-ANIMA et GENESIS.

Alexandros, à nouveau, et Julien Castet, pour cet été 2008 passé ensemble, à rédiger nos mémoires de thèse en nous encourageant mutuellement.

Damien Couroussé, pour tous les moments d'entraide ou de décompression partagés dans le bureau 304.

Aurélie Arliaud, pour son travail qui a souvent facilité le mien, parfois sans même que je m'en rende compte.

J'exprime toute ma reconnaissance aux membres du Jury de cette thèse, qui m'ont fait l'honneur d'évaluer ces travaux : Carlos Agon, Giovanni De Poli, Nadine Guillemot, Jean-Claude Risset et David Wessel.

Enfin, je souhaite remercier de tout mon cœur ceux qui m'ont supporté (dans tous les sens du terme) au cours de ce doctorat : ma famille, bien sûr, mais aussi mes amis, sans qui la réalisation de cette thèse n'aurait pas été possible. Je pense en particulier à Laura, Charlène, Delphine, Marion, Gilles et Sébastien, dont je n'oublierai jamais l'aide qu'ils m'ont apportée.

Contexte de la thèse

Cette thèse a été préparée au laboratoire ICA (Informatique et Création Artistique) de l'Institut polytechnique de Grenoble, en étroite collaboration avec l'ACROE (Association pour la Création et la Recherche sur les Outils d'Expression).

Groupe ACROE – laboratoire ICA

Grenoble INP

46 avenue Félix Viallet

38031 Grenoble Cedex 1

Statut du mémoire de thèse et citations

Ce mémoire de thèse a été rédigé pour servir de support à l'obtention du grade de docteur. Bien que ne portant que le nom de son auteur, il est le fruit d'un travail d'équipe et a été rédigé en collaboration avec le directeur de thèse. Il ne constitue pas une publication scientifique normalisée, pour laquelle tous les contributeurs au travail dont il est rendu compte sont clairement identifiés.

Par conséquent, ce document ne devrait pas faire l'objet de citations dans le cadre de publications normalisées, notamment de publications scientifiques.

Toute référence au travail rapporté dans ce mémoire devrait s'appuyer sur les différentes publications (actes de conférences, articles de journaux, livres) qui s'y rattachent. Les publications ou usages ultérieurs qui pourraient se baser sur ou reprendre tout ou partie de ce travail se devront de respecter les participations de chacun, présentes et passées.

Table des matières

Résumé *1*

Abstract *3*

Remerciements *5*

Contexte de la thèse *6*

Statut du mémoire de thèse et citations *6*

Table des matières *7*

Table des illustrations *11*

Figures **11**

Tableaux **14**

Conventions de présentation *15*

Introduction *17*

1. Création musicale et informatique 19
2. La création musicale par ordinateur : un continuum d'applications 21
   2.1. Le paradigme partition-instrument 22
   2.2. « Composer le son » 22
   2.3. Les langages musicaux 23
   2.4. De la dichotomie au continuum 24
3. Composer le son 24
   3.1. Economiser 24
   3.2. Animer 28
   3.3. Contrôler 36
   3.4. Chassez le naturel… 44
4. Composer la structure musicale 44
   4.1. De la Composition Automatique à la Composition Assistée par Ordinateur 44
   4.2. Vers la programmation musicale 45
   4.3. S'inspirer de la Nature 46
   4.4. La hiérarchisation 49
   4.5. Entre la structure et le son 50
   4.6. La composition avec le modèle physique : un nouveau paradigme 52
5. Deux enseignements 55

Partie A Un Instrumentarium pour la création musicale avec CORDIS-ANIMA *57*

Chapitre 1. Contexte et problématique de nos travaux **58**

1. Le système CORDIS-ANIMA 58
   1.1. Principes et règles de construction 58
   1.2. Aspects algorithmiques et unités physiques 60
   1.3. Modules élémentaires 61
   1.4. Paramètres et conditions initiales des modules 62
   1.5. Structure d'un modèle CORDIS-ANIMA 62
   1.6. Nature des modèles CORDIS-ANIMA 62
   1.7. Mise en œuvre de CORDIS-ANIMA 63

2. GENESIS : un environnement de modélisation et de simulation CORDIS-ANIMA pour la création musicale 64
2.1. Présentation 64
2.2. Fonctionnalités avancées 67
2.3. Aperçu de l'interface 67
2.4. Les modules élémentaires 68
2.5. Types d'interactions 74
3. Introduction à la création musicale avec GENESIS 77
3.1. Organisation générale des modèles 78
3.2. Stratégies de modélisation 79
4. Axes de recherches 80
4.1. Approches analytiques 81
4.2. Approche systémique 82
5. La problématique de l'Instrumentarium musical CORDIS-ANIMA 87
5.1. La notion d'instrumentarium 88
5.2. Définition de l'Instrumentarium musical CORDIS-ANIMA 89
5.3. Objectifs et méthodologie de nos travaux 95

Chapitre 2. Les classifications des instruments de musique 97
1. Les classifications vernaculaires 98
1.1. Classifications chinoises 98
1.2. Classifications indiennes 99
1.3. Classifications grecques 100
2. Les classifications systématiques des instruments acoustiques 101
2.1. Classifications hiérarchiques 102
2.2. Classifications non hiérarchiques 106
3. Les classifications systématiques des « instruments électroniques » 107
3.1. Galpin (1937) 107
3.2. Sachs (1940) 108
3.3. Sakurai 109
3.4. Bakan 109
3.5. Qu'est-ce qu'un « instrument électronique » ? 113
4. Conclusion 116

Conclusion 118

Partie B Formalisation de l'Instrumentarium GENESIS 121

Chapitre 3. Niveaux d'analyse de la création musicale avec CORDIS-ANIMA 122
1. La tripartition de Molino et Nattiez 122
2. Transposition à l'analyse de la modélisation 123
3. Niveaux d'analyse et domaines de connaissance 124

Chapitre 4. Etude élémentaire des modèles 126
1. Constituants d'un modèle 127
1.1. Les sous-modèles 127
1.2. Points d'attache et points de butée 128
1.3. Les structures 128
1.4. Les composants 133
1.5. Les modèles en tant que systèmes 134
2. Classification des structures 135
2.1. Attache et mobilité 135
2.2. Bande passante 136

2.3. Type d'élasticité 136
2.4. Type de viscosité 138
2.5. Topologie 138
2.6. Homogénéité des paramètres 138
3. Les échelles 139
3.1. L'échelle d'inertie 139
3.2. L'échelle fréquentielle 139
3.3. L'échelle d'amplitude 140
4. Types d'interactions entre structures 141
4.1. Interactions entre structures d'échelles différentes 142
4.2. Le couplage 142
4.3. Les interactions unidirectionnelles 144
5. Les fonctions fondamentales 145
5.1. Excitation 146
5.2. Génération acoustique 150
5.3. Captation 154
5.4. Amortissement 158
6. Résumé et conclusion 161

Chapitre 5. Analyse d'un corpus de modèles GENESIS 162
1. Objectifs 162
1.1. Présentation 162
1.2. Un inventaire GENESIS 163
2. Méthodologie 165
2.1. Analyse des modèles 165
2.2. Origine des modèles étudiés 169
2.3. Sélection des modèles 170
2.4. Les modèles auteur 171
3. Etude de l'inventaire 171
3.1. Organisation 171
3.2. Nature des éléments 172
3.3. Les catégories de l'inventaire 174
3.4. Les techniques de modélisation 177
3.5. Modélisation et effets de la quantification 179
3.6. Les objets remarquables 180
4. Relations entre fonctions, composants et techniques de modélisation 181
4.1. Synthèse 181
4.2. Complémentarité des catégories conceptuelles 182
5. Conclusion 183

Chapitre 6. Fonctions et composants associés 185
1. Excitation 186
1.1. Les excitateurs simples 186
1.2. Les excitateurs complexes 188
2. Amortissement 189
3. Génération acoustique 189
3.1. Structures acoustiques primaires et secondaires 189
3.2. Rôle des structures acoustiques secondaires 190
4. Captation 192
5. Génération macro-temporelle 193
5.1. Génération macro-temporelle et gestes instrumentaux 194
5.2. Rôle dans la création musicale 196

6. Déclenchement 197
6.1. Déclenchement et composition 198
6.2. Types de déclenchements 199
6.3. Les Déclencheurs 199
6.4. Fonctionnalités de GENESIS liées au Déclenchement 200
6.5. Déclenchement et énergie 200
6.6. Conclusion sur le Déclenchement 201
7. Modification 201
7.1. Perturbation élastique 201
7.2. Etirement 203
7.3. Modification structurelle dynamique 205
8. Métrologie 207
8.1. Définition 207
8.2. Exemples de mesures dans la fenêtre « Regarder » 208
8.3. Généralisation 209
8.4. Exemples de composants de Métrologie 210
8.5. Les Détecteurs 211
9. Initialisation 214
10. Conclusion 215

Chapitre 7. Principes généraux d'organisation des modèles 218
1. La composition de fonctions 218
2. Niveaux, échelles et hiérarchie dans les modèles 220
2.1. La hiérarchisation 220
2.2. Niveaux hiérarchiques et échelles physiques 221
3. La génération d'évènements 224
4. Conclusion 225

Conclusion et perspectives 227

Bibliographie 233

Glossaire 245

Annexes 249

Annexe 1. Paramètres et conditions initiales des modules GENESIS 251

Annexe 2. La Cellule TFP 252
1. Définition et algorithme 252
2. Utilisation de la Cellule TFP pour la Métrologie 253
3. Le Chevalet 253

Annexe 3. Generation of Complex Sound Sequences using Physical Models with Dynamical Structures 255

Annexe 4. Exemples d'études de modèles complets 264
1. Le « Super Maracas » 264
2. Le modèle « RESPIRATIONS » 266
3. Le modèle « CONDENSACORDE » 269

Table des illustrations

Figures

Figure 1 : Les points de communication CORDIS-ANIMA. 58

Figure 2 : Connexion d'un point M et d'un point L. 59

Figure 3 : Les modules élémentaires <MAT> et <LIA> 59

Figure 4 : Un exemple de réseau CORDIS-ANIMA. 60

Figure 5 : Plusieurs modules disposés sur l'Etabli GENESIS. Le deuxième module RES n'est pas complètement connecté, ce qui représenté par un module « Blanc » 65

Figure 6 : L'Etabli et l'espace de simulation 66

Figure 7 : Vue globale de l'interface utilisateur de GENESIS (version 1.6) 68

Figure 8 : Le module BUT, avec S > 0. (a) Interaction inactive (X_1-X_2 > S). (b) Interaction active (X_1-X_2 ≤ S) 71

Figure 9 : Cause de l'effet Thil 72

Figure 10 : La fenêtre de paramètres d'une liaison LNL 73

Figure 11 : La fenêtre d'édition graphique de la caractéristique « Différence de position – Force » ou LNLK. La grandeur X_1-X_2 est représentée en abscisses et la force exercée par $\mathcal{M}_1$ sur $\mathcal{M}_2$ ($F_{1,2}$) en ordonnées. La fenêtre d'édition de la caractéristique LNLZ est totalement identique, avec la grandeur V_1-V_2 en abscisses. 73

Figure 12 : Caractéristiques LNLK de deux modules LNL équivalents à un module RES (a) et un module BUT sans viscosité de seuil S > 0 (b). 74

Figure 13 : Caractéristique en élasticité d'interactions non linéaires. (a) Elasticité permanente (la caractéristique s'annule en un seul point). (b) Elasticité non permanente (la caractéristique s'annule sur deux intervalles). 75

Figure 14 : Caractéristique LNLK d'un module LNL simulant une interaction répulsive avec seuil S. 76

Figure 15 : Caractéristique LNLZ d'un module LNL simulant un frottement d'archet 77

Figure 16 : Deux objets acoustiques simples : une Corde (a) et une Membrane (b). 78

Figure 17 : La hiérarchisation des composants d'un modèle physique dans le « Manuel d'utilisation pour GENESIS » 84

Figure 18 : La tripartition en sémiologique de la musique (d'après [Nattiez 1975, p. 52]) 122

Figure 19 : Les niveaux d'analyse du processus de création avec GENESIS 123

Figure 20 : Organisation des domaines de connaissance en fonction des niveau d'analyse de la situation de création et de perception musicale dans GENESIS 124

Figure 21 : Transformation d'un sous-modèle implicite en un sous-modèle explicite 127

Figure 22 : Deux structures partageant un point d'attache 130

Figure 23 : Modèles de Cordes percutées. (a) Version initiale. (b) Après duplication de la Corde. 131

Figure 24 : Approche systémique des modèles GENESIS. (a) Aspect structurel. (b) Aspect fonctionnel. 134

Figure 25 : Un Chapelet "maracassé" 137

Figure 26 : Modèle général d'interaction entre deux structures S_1 et S_2 141

Figure 27 : Deux modules CEL couplés par un module RES 144

Figure 28 : Energie initiale potentielle. La conversion en énergie cinétique est spontanée, car la structure n'est pas initialement dans son état de repos 146

Figure 29 : Energie initiale cinétique 146

Figure 30 : Excitation macro-temporelle et excitation acoustique 149

Figure 31 : Caractéristique LNLK d'un module LNL « en X^3 » 151

Figure 32 : Le ZIG 152

Figure 33 : Mouvement d'un ZIG non amorti, avec la représentation de deux états successifs 153

Figure 34 : Modèle avec structure acoustique mobile 156

Figure 35 : Captation de structures mobiles. (a) Par composant FRO+SOF. (b) Ecoute différentielle. 158

Figure 36 : L'étouffement : le module $\mathcal{M}_\varepsilon$ amortit les modules $\mathcal{M}_1$ et $\mathcal{M}_2$ tant qu'il se trouve en dessous d'eux 161

Figure 37 : Schéma général de l'organisation conceptuelle de l'Instrumentarium GENESIS 163

Figure 38 : Excitation « macroscopique » d'une Corde par percussion 173

Figure 39 : Application d'une force constante à un module <MAT> (élément « Pesanteur » de l'inventaire) 174

Figure 40 : Pincement d'une structure à haute vitesse. La caractéristique LNLK du Plectre est représentée, avec les points de fonctionnement aux instants de simulation n et n+1. Le pincement n'a lieu que dans la situation de gauche. A droite, le « Plectre » passe en un seul pas de simulation d'un côté à l'autre du seuil de l'interaction, il n'a donc aucune action sur $\mathcal{M}_1$. 180

Figure 41 : Réalisation d'une fonction par différents composants ou groupes de composants. 181

Figure 42 : Une ou plusieurs techniques de modélisation permettent de réaliser une fonction avec un résultat attendu spécifique. 182

Figure 43 : Positionnement des catégories conceptuelles dans les niveaux d'analyse 182

Figure 44 : Organisation conceptuelle partielle de l'Instrumentarium GENESIS 183

Figure 45 : Le modèle EXEMPLE-1 185

Figure 46 : Excitateur simple intégré à une structure source 186

Figure 47 : "L'Amplificateur". (a) Inactif. (b) Actif. 187

Figure 48 : Décomposition d'un excitateur complexe en deux sous-composants : un détecteur et un excitateur simple. 188

Figure 49 : Le modèle EXEMPLE-2 ; ajout d'une structure acoustique secondaire (Corde maracassée) 190

Figure 50 : Interaction unidirectionnelle entre une structure acoustique primaire et une structure acoustique secondaire. Le « signal de sortie » S(n) est capté par un module SOX. 192

Figure 51 : Le modèle EXEMPLE-3 ; ajout d'un générateur macro-temporel (une Cellule) 193

Figure 52 : Pincement de plusieurs cordes par un seul générateur macro-temporel. 195

Figure 53 : Le modèle EXEMPLE-4 ; ajout d'un deuxième générateur macro-temporel à une échelle fréquentielle différente. 196

Figure 54 : Le modèle EXEMPLE-5 ; ajout d'un déclencheur élémentaire au modèle EXEMPLE-3 198

Figure 55 : Le modèle EXEMPLE-6 ; ajout d'une Perturbation élastique de la Corde par un « Doigt » 202

Figure 56 : La Perturbation élastique. (a) Perturbation ponctuelle. (b) Perturbation permanente. .. 203

Figure 57 : Etirement d'une Corde maracassée 204

Figure 58 : La Modification structurelle dynamique 205

Figure 59 : Modification structurelle dynamique. (a) Augmentation de la taille. (b) Modification de la topologie 205

Figure 60 : La caractéristique LNLK du composant liaison Piège 206

Figure 61 : Une Règle 208

Figure 62 : Mesure indirecte de la vitesse d'un module grâce à une Cellule TFP. La position $X_V(n)$ est proportionnelle à V(n-1) 209

Figure 63 : Mesure de l'accélération d'un module grâce à deux Cellules TFP « en série ». La position $X_A(n)$ est proportionnelle à l'accélération A de $\mathcal{M}_I$ à l'instant n-2, A(n-2). 210

Figure 64 : Représentation générale d'un Détecteur 212

Figure 65 : Le modèle EXEMPLE-7 ; ajout d'un Détecteur couplé à un Etouffoir 212

Figure 66 : $\mathcal{M}_I$ percute $\mathcal{M}_{DI}$ et lui communique un mouvement dirigé vers le bas. 213

Figure 67 : La friction de $\mathcal{M}_{DI}$ sur $\mathcal{M}_{D2}$ entraîne un mouvement vers le bas de ce dernier, ce qui déclenche la Gâchette (le point de fonctionnement passe dans la portion non nulle de la caractéristique LNLK) 213

Figure 68 : $\mathcal{M}_{D2}$ percute $\mathcal{M}_{\mathcal{E}}$, lequel commence à descendre vers la corde pour réaliser l'Amortissement 214

Figure 69 : Organisation des fonctions GENESIS autour d'une structure 216

Figure 70 : Exemple de graphe fonctionnel. Les fonctions sont nommées F_i. Les composants associés à chacune ne sont pas nommés. 218

Figure 71 : Exemples simples de composition de fonctions : en parallèle (a) ; en série (b). 219

Figure 72 : Graphe fonctionnel du modèle EXEMPLE-7 220

Figure 73: La Gâchette 246

Figure 74 : Caractéristiques LNLK du module LNL de deux Gâchettes. (a) Gâchette « progressive » (la force croît avec la distance). (b) Gâchette « brutale » (la force est maximale dès que le seuil est franchi). 246

Figure 75 : Caractéristique LNLK d'une Liaison piège 247

Figure 76 : Caractéristique LNLK du module LNL d'un Plectre 247

Figure 77 : Le « Super Maracas » sur l'Etabli GENESIS 265

Figure 78 : Graphe fonctionnel du modèle « Super Maracas » 265

Figure 79 : Le modèles « RESPIRATIONS » sur l'Etabli GENESIS 267
Figure 80 : Graphe fonctionnel du modèle « RESPIRATIONS » 268
Figure 81 : Le modèle « CONDENSACORDE » sur l'Etabli GENESIS 269
Figure 82 : Détail du modèle « CONDENSACORDE » faisant apparaître les Liaisons piège 270
Figure 83 : Graphe fonctionnel du modèle « CONDENSACORDE » 271

Tableaux

Tableau 1 : Liste des familles d'instruments GM1 (Instrument Patch Map). 92
Tableau 2 : Liste des huit matériaux composant les instruments des classifications chinoises 98
Tableau 3 : Deux classifications des matériaux composant les instruments de musique par Chu Tsai-Yü, selon les techniques de jeu et la fonction musicale 99
Tableau 4 : Classification complète de la sous-catégorie contenant les cloches d'église dans le système H/S 104
Tableau 5: Les trois premiers niveaux du système GAMES de classification des electronophones (d'après [Bakan&al. 1990]) 111
Tableau 6 : Paramètres et propriétés de deux modules CEL non couplés 144
Tableau 7 : Organisation de l'inventaire GENESIS 172
Tableau 8 : Paramètres et conditions initiales du modèle EXEMPLE-1 185
Tableau 9 : Paramètres et conditions initiales de la Corde maracassée du modèle EXEMPLE-2 191
Tableau 10 : Techniques et composants de Captation 193
Tableau 11 : Récapitulatif des catégories et sous-catégories de fonctions GENESIS 217
Tableau 12 : Paramètres et conditions initiales des modules élémentaires GENESIS 251

Conventions de présentation

Nous utiliserons les conventions de présentation suivantes dans ce document :

- Les noms des modules GENESIS identifiés dans les modèles donnés en exemple sont typographiés dans la police de caractères *Brush Script MT*.

  Exemples : $\mathcal{M}_l$ (pour une module <MAT>), $\mathcal{L}_\varepsilon$ (pour un module <LIA>)

- Les noms des éléments de l'Instrumentarium tirés du langage courant, en référence à des objets réels, commencent par une majuscule, afin d'éviter toute confusion entre ce qui relève de la modélisation et ce qui relève du monde physique.

  Exemples : Doigt, Chevalet.

- Les termes définis dans le Glossaire (p. 245) sont présentés en caractères gras et suivis d'un astérisque lors de leur première apparition dans le texte.

  Exemples : **Liaison piège***, **Domino***

  Remarque
  Le Glossaire de ce document donne les définitions succinctes de termes couramment employés mais qui ne jouent pas un rôle central dans notre propos. Le corps du texte lui-même (particulièrement le Chapitre 5) comporte les descriptions détaillées des concepts plus fondamentaux.

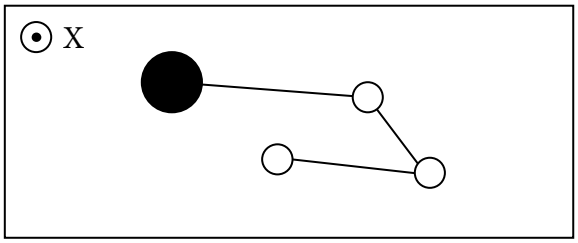
- Nous utiliserons ponctuellement une notation textuelle de la forme :

  <Type 1>+<Type 2>

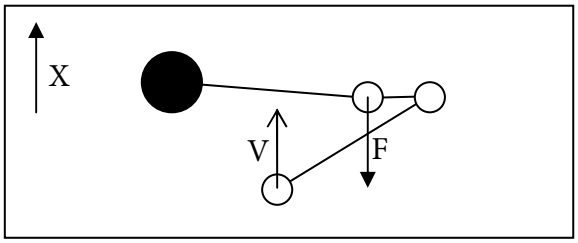
  pour désigner la connexion d'un module de Type 1 à un module de Type 2. Cette notation n'a aucune prétention à la généralité, elle permet simplement de nommer rapidement des combinaisons très simples de modules.

  Exemples : « MAS+BUT » dénote la connexion entre un module MAS et un module BUT, et « FRO+SOF+FRO » la connexion de deux modules FRO à un module SOF.

- Nous utiliserons deux types de représentations pour les modèles GENESIS. La première correspond à une visualisation dans l'espace de modélisation (l'Etabli) ; le point de vue est perpendiculaire à celui-ci et parallèle à l'axe de simulation (X). Ce dernier est figuré par deux cercles concentriques. La deuxième correspond à une visualisation dans l'espace de simulation ; le point de vue est parallèle au plan de l'établi. L'axe de simulation est représenté par une flèche tournée vers le haut.



Représentation dans l'espace de modélisation



Représentation dans l'espace de simulation

- Nous utiliserons les représentations suivantes pour les différents modules GENESIS :

Modules <MAT>	
MAS	○
CEL	●
SOL	●
SOF	■

Modules <LIA>		
RES		
FRO		
REF		
BUT	Elastique (Z=0)	
	Visqueuse (K=0)	
	Viscoélastique	
LNL	Elastique (LNLZ=0)	
	Visqueuse (LNLK=0)	
	Viscoélastique	
SOX		↘

Les modules MAS et CEL auront un diamètre reflétant leur inertie, sans être proportionnel à celle-ci. En effet, le rapport entre les inerties maximale et minimale au sein d'un modèle pouvant être de l'ordre de 10^6, voire plus, il est bien entendu impossible de le traduire visuellement de façon proportionnelle. Les différences de diamètre représentent donc l'existence de plusieurs échelles d'inertie.

Introduction

L'informatique musicale n'est pas un champ homogène, mais un carrefour auquel de nouvelles routes n'ont cessé d'aboutir depuis sa naissance, à la fin des années 50. A ses deux axes historiques et fondateurs, la synthèse sonore et la composition assistée par ordinateur (CAO), se sont progressivement greffés de nouveaux domaines, souvent intimement liés les uns aux autres : psychoacoustique, analyse musicale, extraction et recherche d'informations musicales (ou *music information retrieval*), stockage et diffusion des œuvres, etc.

L'informatique musicale est un ensemble extrêmement riche et varié d'outils et de techniques utilisés dans différents objectifs. Ses domaines d'application les plus récents sont relatifs à la gestion et à la diffusion des données sonores et musicales, qui connaissent depuis une dizaine d'années un développement intense en réponse aux nouveaux modes d'accès à la musique, notamment via de très grandes bases d'œuvres disponibles sur Internet ou sur un support local (disques durs de très grande capacité). Ici, l'informatique musicale intervient donc d'une part dans la relation entre les distributeurs et le public et d'autre part dans l'interaction entre l'auditeur et la machine. Mais elle joue également un rôle prépondérant dans des domaines « purement scientifiques », en particulier l'étude de la perception et de la cognition musicale - les résultats des recherches menées dans ces domaines étant d'ailleurs exploités pour des applications liées à la diffusion de la musique.

Le contexte général de nos travaux de recherche est l'un des objectifs premiers de l'informatique musicale : la création proprement dite. Celle-ci se ramifie en plusieurs domaines : la synthèse sonore et la CAO, que nous avons déjà cités, auxquels s'ajoutent, entre autres, la spatialisation, le suivi de partition ou le développement de nouvelles interfaces musicales et de système musicaux interactifs. Ce sont uniquement les deux premiers domaines qui seront au cœur de nos préoccupations.

Cette thèse a pour cadre l'étude de la création musicale à l'aide du système CORDIS-ANIMA [Cadoz&al. 1993]. Ce dernier permet de construire et de simuler des objets physiques virtuels constitués de réseaux de modules élémentaires ayant chacun une interprétation physique simple. Les composants de ces *modèles physiques* peuvent aussi bien avoir des mouvements situés à des fréquences d'oscillation audibles – ce qui permet de réaliser la synthèse de sons – que des mouvements situées à des fréquences inférieures au seuil de l'audition, correspondant à des « gestes » virtuels à même d'engendrer des structures musicales. L'environnement de création musicale GENESIS [Castagné 2002], basé sur CORDIS-ANIMA et qui a servi de support à tous nos travaux, a ainsi permis de composer des pièces musicales, certaines étant même produites entièrement par un seul modèle. Bien que le système CORDIS-ANIMA soit avant tout perçu par la communauté de l'informatique musicale comme une méthode de synthèse du son (à l'instar de la majorité des techniques de modélisation physique), GENESIS doit donc aussi être compté parmi les environnements de CAO. Il propose toutefois un paradigme de composition entièrement nouveau, puisque uniquement basé sur la modélisation physique et non sur les notions traditionnelles de l'écriture musicale.

En effet, CORDIS-ANIMA est en premier lieu un système généraliste de modélisation et de simulation physique, ce qui implique que les concepts qu'il met en jeu ne sont pas directement liés au domaine des sons et encore moins à celui du solfège et de l'écriture musicale. Dans GENESIS, les notions de note, de rythme ou d'harmonie, pour n'en citer que quelques unes, n'apparaissent nulle part de façon explicite : elles émergent du comportement des modèles au cours de leur simulation. La création

musicale ne peut s'appuyer directement que sur des grandeurs physiques : position, vitesse, inertie, élasticité, viscosité, etc. Celles-ci sont susceptibles d'être comprises par tout utilisateur, parce que nous les expérimentons en permanence au quotidien en interagissant avec les objets qui nous entourent. Il est ainsi très facile de comparer les modules élémentaires de GENESIS à des objets de la vie quotidienne (par exemples les billes et les ressorts) pour les présenter à un nouvel utilisateur. Par conséquent, les principes fondamentaux de CORDIS-ANIMA et de GENESIS se laissent facilement découvrir par des personnes non spécialisées dans les domaines de l'informatique musicale, des mathématiques ou de la physique. Il n'y a cependant aucune raison particulière pour que cette découverte soit plus aisée pour un musicien que pour une personne n'ayant aucune pratique musicale particulière.

L'absence dans l'environnement GENESIS de toute représentation musicale symbolique et de tout paramètre ou composant permettant habituellement de contrôler les propriétés du son (forme d'onde, enveloppe, filtre, etc.) constitue alors un défi, à la fois fécond et exigeant, qui conduit le musicien à reconsidérer son rapport au matériau musical et sonore, en adoptant le point de vue de la « pensée physique » [Castagné&Cadoz 2002]. Ce changement peut s'avérer difficile à opérer en l'absence de toute référence : il est probable qu'une personne utilisant pour la première fois GENESIS sans autre aide que le mode d'emploi du logiciel serait dans l'incapacité d'en découvrir le potentiel (à moins d'y consacrer un effort important) et finirait par l'abandonner au profit d'outils plus « conventionnels ». En dépit de l'intuitivité indéniable des concepts mis en œuvre dans CORDIS-ANIMA, la création musicale à l'aide de ce système n'est pas triviale.

Par ailleurs, le système CORDIS-ANIMA se caractérise par la simplicité de ses modules élémentaires, qui permet, par composition, d'élaborer une grande diversité de modèles, d'une complexité arbitraire. Cette particularité dote le système d'une grande généralité, démontrée par la variété des simulations qui ont été réalisés grâce à lui, du domaine de l'animation (fumées, foules, véhicules motorisés en déplacement sur terrain meuble) à la synthèse sonore, en passant par la simulation multisensorielle à retour d'effort (simulation du frottement d'un archet sur une corde, par exemple). La modularité « extrême » de CORDIS-ANIMA a cependant un coût. Si elle facilite la compréhension de ses principes fondamentaux, elle rend parfois délicate la construction de modèles dans un objectif précis. Disposant seulement de briques élémentaires au comportement simple, l'utilisateur débutant peut se trouver dans l'incapacité d'imaginer comment organiser celles-ci de façon à arriver au résultat, parfois très complexe, auquel il aspire. Ce problème se pose dans tous les environnements modulaires d'informatique musicale. Il est plus crucial encore dans le cas de GENESIS en raison du nombre très restreint de modules disponibles (10), à comparer aux dizaines, voire aux centaines de modules proposés dans des environnements comme Max/MSP ou Csound.

Face à la perte de repères induite par le changement de paradigme proposé par CORDIS-ANIMA et aux difficultés inhérentes à la pratique d'un environnement modulaire, il est évident qu'une utilisation éclairée de GENESIS, ne peut se passer d'un « guide » permettant à l'utilisateur de découvrir les possibilités de l'environnement, de « retrouver ses marques », et ainsi d'atteindre un degré de maîtrise suffisant pour développer une pratique sonore ou musicale aboutie. Une aide lui est indispensable pour gravir au mieux les échelons de complexité menant de la compréhension des modules élémentaires à la conception de modèles produisant des séquences sonores significatives d'un point de vue musical. La conception et la réalisation de ce guide relève d'un réel travail de recherche dans la mesure où elle doit répondre à plusieurs questions fondamentales :

- Quelles sont les possibilités offertes par CORDIS-ANIMA et GENESIS ?
- Comment organiser ces possibilités de façon rationnelle ?

- Comment transmettre les connaissances liées à CORDIS-ANIMA et GENESIS ?

Tentant de répondre partiellement à ces questions, les travaux réalisés au cours de cette thèse s'intègrent à l'élaboration d'un environnement didactique complet pour GENESIS, dont la fonction est d'accompagner l'utilisateur dans son passage à la « pensée physique modulaire ».

Nous proposons dans cette thèse une organisation générale des modèles CORDIS-ANIMA pour la création musicale, fondée sur l'identification et la mise en relation des fonctions, composants et principes fondamentaux de modélisation permettant la construction de modèles physiques pertinents d'un point de vue musical. Cette organisation forme la base de ce que nous appelons l'*Instrumentarium musical CORDIS-ANIMA*. Bien plus qu'une simple collection structurée de modèles physiques, cette expression désigne une vision systémique de l'ensemble des modèles CORDIS-ANIMA pour la création musicale, construite selon une démarche partant des aspects les plus élémentaires pour aller vers ceux de plus haut niveau. L'Instrumentarium, dont nous donnerons une définition détaillée dans le Chapitre 1, est destiné à former le principal élément de l'environnement didactique de GENESIS.

1. Création musicale et informatique

Avant d'entrer dans le cœur de notre sujet, il est important de situer CORDIS-ANIMA et GENESIS dans le contexte de la création musicale à l'aide de l'ordinateur en ce qui concerne les domaines de la synthèse et de la composition. Cette mise en perspective est rendue nécessaire par la singularité des concepts et des méthodes de travail proposés au compositeur par ces outils, singularité qui se justifie, non pas par une simple recherche de la « nouveauté », mais par une réflexion approfondie sur l'évolution des moyens de création apportés par les nouvelles technologies. Par ailleurs, on l'aura compris, la conception de l'Instrumentarium a pour objectif d'aboutir au développement d'outils concrets permettant d'aider la pratique de la création avec CORDIS-ANIMA et GENESIS. Dans cette perspective, il nous apparaît indispensable de réaliser une étude des principales problématiques liées à la synthèse sonore numérique et à la CAO, de manière à en tirer toutes les conclusions permettant de guider nos travaux et d'accroître ainsi les chances de succès de notre entreprise.

Pour commencer, alors que l'informatique musicale est aujourd'hui présente dans la plupart des étapes du processus de création musicale, tentons d'apporter quelques éléments de réponse à la question fondamentale suivante : pourquoi utiliser l'ordinateur pour créer de la musique ? L'utilisation d'un outil n'étant pas une fin en soi, il existe, hormis le simple besoin de satisfaire notre curiosité face aux nouvelles possibilités offertes par les évolutions technologiques, des raisons plus profondes à la mise en œuvre dans ce contexte des technologies complexes de l'informatique.

Deux de ces raisons sont à rechercher dans l'histoire même de la musique et nous n'avons pas besoin de remonter à plus d'un siècle en arrière pour les voir apparaître clairement. Le passage entre le XIXe et le XXe siècle est en effet le point de départ d'une période décisive au cours de laquelle de profonds bouleversements vont avoir lieu.

Tout d'abord, la règle selon la laquelle seuls les sons produits par les instruments traditionnels sont considérés comme musicaux va être remise en question : dès le début du XXe siècle, des compositeurs recherchent de nouvelles sonorités à intégrer à leurs œuvres [DePoli 1996]. Ainsi, le peintre et compositeur italien Luigi Russolo publie en 1913 un court manifeste, *L'art des bruits* (*L'arte dei rumori*), fervent plaidoyer pour une généralisation de l'usage des bruits (produits grâce à de nouvelles machines issues des progrès technologiques) dans les compositions futures [Russolo 1916]. De même, Edgar Varèse écrit en 1917 : «La musique, qui doit vivre et vibrer, a besoin de nouveaux moyens

d'expression, et la science seule peut lui infuser une sève adolescente. Je rêve les instruments obéissant à la pensée et qui, avec l'apport d'une floraison de timbres insoupçonnés, se prêtent aux combinaisons qu'il me plaira de leur imposer et se plient à l'exigence de mon rythme intérieur. » L'exploration d'un nouvel espace des timbres va ainsi avoir lieu, d'abord à l'aide des instruments électroniques (Theremin, Orgue Hammond, Ondes Martenot, etc.) puis des ordinateurs, qui ont théoriquement la capacité de produire tous les sons audibles. Nous tenons ici la première raison de l'utilisation de l'ordinateur pour la création musicale : *l'informatique permet d'accéder à un espace sonore illimité* et donc d'accroître considérablement la liberté d'expression du compositeur. Nous verrons toutefois que ce tableau n'est pas aussi idyllique qu'il le semblerait après cette première présentation.

L'autre mutation toute aussi fondamentale touchant la musique au cours du XXe siècle porte cette fois sur la structure même des œuvres : c'est la remise en cause des règles de composition traditionnelles et de la théorie musicale dans sa globalité. Ce mouvement, initié en particulier par Debussy [Griffiths 1992], ne cessera de s'amplifier pour aboutir, par exemple, au sérialisme, dont le propos est d'éviter systématiquement la tonalité afin d'explorer les rapports de hauteurs jusqu'alors inemployés. Les règles classiques sont détrônées et ne forment plus, désormais, que l'un des systèmes possibles parmi d'autres, aucun d'entre eux n'ayant un caractère absolu. On observe également une utilisation croissante de gammes différentes de la gamme tempérée, en particulier celles qui utilisent des intervalles élémentaires plus petits que le demi-ton (microtonalité). Chaque compositeur a ainsi le loisir de créer les contraintes plus ou moins formelles qui vont orienter son travail dans une direction précise parmi toutes celles qui sont envisageables. Les plus formalistes vont mettre en place des systèmes de composition d'une telle rigueur que l'ordinateur va constituer une aide précieuse, voire indispensable, lors de l'écriture, prenant en charge les aspects les plus fastidieux du processus. Il devient même le support de méthodes de composition qui ne pourraient pas être mises en œuvre sans son aide, car elles demandent la réalisation de très nombreux calculs. Ici, l'ordinateur est utilisé parce qu'il permet de réaliser des processus de composition d'une complexité arbitraire, répondant ainsi aux besoins de compositeurs utilisant l'algorithmique pour explorer l'espace laissé libre par la « disparition » des règles antérieures. Ces processus incluent en particulier le recours au hasard comme dans les travaux de Xenakis [Xenakis 1971]. Signalons que lors de la première expérience de composition à l'aide de l'ordinateur, Hiller et Isaacson [Hiller&Isaacson 1959] ne cherchaient pas à explorer de nouveaux territoires musicaux, mais au contraire à traduire sous forme de programme les règles du contrepoint et de l'harmonie et donc à produire automatiquement des œuvres d'un style forcément classique. En cela, ces travaux – ayant abouti à l'écriture par la machine du fameux quatuor à cordes *Illiac Suite* – se rapprochent plus de la cybernétique, très en vogue à cette époque où l'on découvre les possibilités de l'ordinateur, que de la création musicale proprement dite.

Nous avons déjà proposé deux justifications fondamentales de l'utilisation de l'ordinateur pour la création musicale. Une troisième émerge des considérations qui précèdent. Avec la libération du processus de composition que nous venons d'évoquer, le compositeur peut envisager la création d'œuvres impossibles à exécuter par des interprètes humains, car exigeant une virtuosité idéale, incompatible avec les possibilités corporelles. C'est ici qu'entre en jeu une autre caractéristique de l'ordinateur : la *précision.* Convenablement programmé, l'ordinateur est en effet capable de suivre une partition (électronique) avec toute la précision et la rapidité nécessaires. Certains iront jusqu'à utiliser cet argument pour tenter d'évincer l'interprète, considéré alors comme un intermédiaire encombrant et peu fiable entre l'idée musicale et sa réalisation sonore. Comme nous le verrons plus en détail, cette attitude conduit pourtant à la perte d'un des composants essentiels de la chaîne musicale et doit sans doute être réservée à des situations où l'interprète ne *peut pas* intervenir, tout simplement parce que le processus de production sonore ne peut pas être ramené à une situation instrumentale. Sans tomber

dans ces positions extrêmes – qui d'ailleurs n'ont plus guère de crédit aujourd'hui, alors que l'expérience accumulée est suffisante pour en démontrer l'imprudence, pour ne pas dire l'arrogance – il est indéniable que l'ordinateur, en plus de mettre à notre disposition des sons inouïs, nous offre la possibilité de les jouer plus vite et plus précisément que nous ne le pourrions physiquement. Ce progrès doit toutefois être mis en balance avec une conséquence inévitable de l'exécution musicale par l'ordinateur : la disparition de l'expressivité propre à l'interprétation musicale par des instrumentistes. Nous aborderons ce point crucial dans la suite de cette introduction.

L'ordinateur est doué d'une forme particulière de précision, la *reproductibilité*, c'est-à-dire la capacité de reproduire à l'identique n'importe quel phénomène enregistré. Ceci le démarque clairement d'une autre catégorie de machines permettant l'expérimentation musicale, tant au niveau de la synthèse que de la composition : les synthétiseurs analogiques, bien connus pour leur manque de fiabilité et en particulier leur sensibilité aux conditions physiques de jeu (température, humidité, etc.). La technologie du numérique, au cœur même de l'ordinateur, est au contraire déterministe par nature et s'affranchit de ce type de problèmes. En outre, elle permet d'intervenir sur le son à un niveau de détail inaccessible avec n'importe quel autre moyen technologique (on parle souvent de précision « chirurgicale » [Moorer 1977]), puisqu'il est possible d'accéder à chaque échantillon numérique qui le compose.

D'après ce que nous venons de dire, l'utilisation de l'ordinateur pour la création musicale est donc en grande partie motivée par le dépassement de limites naturelles : limites des instruments acoustiques et électronique analogiques qui offrent un espace sonore restreint par rapport à l'ensemble des sons audibles ; limites de notre système cognitif qui est capable de concevoir des processus de composition si sophistiqués qu'ils peuvent difficilement être réalisés sans automatisation ; limites, enfin, de notre propre corps dont la précision et la rapidité des comportements moteurs ne peuvent égaler celles de la machine. Comme dans de nombreux autres domaines, l'un des apports de l'informatique est un affranchissement par rapport à des contraintes autrement indépassables, liées soit aux capacités humaines, soit à la nature physique des objets de notre environnement. Mais il reste à déterminer le coût de cet affranchissement, question qui sera présente en filigrane de notre présentation des applications de l'informatique musicale pour la création.

2. La création musicale par ordinateur : un continuum d'applications

Afin de situer CORDIS-ANIMA et GENESIS dans leur contexte, on pourrait tenter d'énumérer toutes les applications de l'informatique musicale pour la création. Mais cette démarche apparaît d'emblée comme irréaliste, étant donné leur extrême diversité, même en se restreignant à la synthèse sonore et à la CAO. Nous allons donc nous borner à montrer que ces deux domaines forment les pôles opposés d'un véritable continuum d'applications.

Le premier de ces pôles correspond aux applications permettant uniquement de *composer la structure abstraite* d'une œuvre, c'est-à-dire d'organiser dans le temps une succession d'évènements musicaux (le plus souvent, des notes) sans les réaliser effectivement. L'adjectif « abstraite » désigne le fait que la structure créée est composée de symboles musicaux et qu'aucun son n'est produit – l'œuvre ne se *concrétise* donc pas par un phénomène sonore. Le résultat de l'exécution de l'application est une partition adoptant une notation spécifique au « système » chargé de l'exécuter : notation traditionnelle[1]

[1] Cette notation peut être modifiée ou augmentée de nouveaux symboles si l'instrument doit être joué de façon non conventionnelle ou s'il s'agit d'un instrument non traditionnel.

pour des instrumentistes, ou « partition électronique » pour un programme de synthèse sonore. Comme le fait remarquer Cadoz, « si on considère le terme "composer" dans son étymologie stricte (poser ensemble), la "com-position" n'est qu'un des modes du processus de création », correspondant à l'organisation d'entités musicales préexistantes selon le seul libre arbitre du compositeur, « l'autre étant la "génération" dans le sens très large (générique) de la fourniture, à l'aide d'un processus conceptuel ou matériel, d'un ensemble de données à partir d'un ensemble de données plus petit » [Cadoz 2002a]. En toute rigueur, il faudrait parler de « construction » musicale pour désigner ce qu'on nomme habituellement « composition ». Com-position et génération sont fréquemment liées de façon intime. Le choix libre de combiner deux entités musicales n'est-il pas lui-même, dans une certaine mesure, le résultat d'un processus de génération cognitive plus ou moins conscient ? A l'inverse, un processus de génération sonore est forcément présent pour concrétiser les entités composant une pièce musicale – à moins que le compositeur ne décide de choisir lui-même les valeurs de chaque échantillon sonore, ce qui est, de toute évidence, complètement irréaliste.

Le pôle opposé à la création musicale est constitué des applications dédiées à la *production sonore*, qui n'offrent aucune fonction permettant la conception d'une structure musicale ; par production sonore, nous entendons à la fois la *synthèse*, qui génère le son algorithmiquement à partir de données non sonores, et le *traitement*, où un matériau sonore déjà disponible est modifié de différentes manières pour obtenir le son final (la frontière entre ces deux domaines étant parfois relativement floue). Ces applications produisent donc des sons initialement isolés, qu'on peut articuler dans une structure musicale d'au moins trois manières différentes :

- par montage, avec les outils matériels ou logiciels appropriés ;
- par jeu automatisé, lorsque l'application est capable d'exécuter des « partitions » ;
- par jeu « instrumental », lorsqu'une interaction en temps réel est possible avec l'application.

2.1. Le paradigme partition-instrument

La dichotomie production sonore/composition apparaît dès les premiers pas de l'informatique musicale : les expériences de Mathews [Mathews 1969 ; Roads 1980a] appartiennent à la première catégorie, celles d'Hiller et Isaacson [Hiller&Isaacson 1959] à la deuxième. Depuis cette époque, la séparation des deux domaines a eu tendance à perdurer, sans doute parce qu'elle a l'avantage de présenter l'informatique musicale selon une approche familière, similaire à celle qui prévalait traditionnellement : le compositeur commence par créer la partition, *puis* celle-ci est interprétée par un ou plusieurs instrumentistes. Ce mode d'organisation, que nous nommerons *paradigme partition-instrument*, n'est cependant qu'une des façons d'envisager le processus de création musicale avec l'ordinateur. Comme le remarque d'ailleurs Paul Berg [Berg 1996], son importance persistante dans la recherche en informatique musicale a sans doute constitué un frein au développement d'autres voies plus à même d'exploiter les possibilités offertes par les nouvelles technologies au niveau de l'interaction entre le niveau structurel d'une œuvre et son niveau sonore.

2.2. « Composer le son »

Jusqu'à présent, nous avons opposé deux types d'applications en fonction de la nature de leurs résultats et donc, implicitement, en fonction de l'intention de l'utilisateur. Nous aurions ainsi d'un côté les applications permettant d'écrire – avec un certain degré d'automatisation – des partitions, et de l'autre celles permettant de produire des sons et donc d'*exécuter* des œuvres selon l'une des trois manières que nous avons mentionnées. Cependant, en nous cantonnant à ces deux pôles, nous

passerions à côté d'une possibilité inédite jusqu'à l'apparition de l'ordinateur, celle qui consiste à étendre le travail de création jusqu'au niveau de la structure sonore, c'est-à-dire à *composer le son* [Risset 1991].

Considérons l'acte de produire avec l'ordinateur un son isolé. Depuis le bouleversement artistique et culturel que nous avons évoqué, il est tout à fait légitime de considérer ce son, aussi simple soit-il, comme une œuvre musicale en soi. Or, quelle que soit l'application utilisée, elle offre nécessairement les moyens de contrôler dans une certaine mesure les propriétés de ce son, du simple choix de la hauteur fondamentale à la fourniture manuelle de tous les échantillons numériques, en passant par l'application de diverses enveloppes aux paramètres d'amplitude, de hauteur ou de filtrage. Ces contrôles ne sont contraints que par des contingences techniques sans cesses repoussées et non par des lois naturelles comme pour les instruments acoustiques : l'espace qu'ils offrent à l'utilisateur est donc totalement libre. Avec la possibilité de contrôler vient celle de prévoir les évènements qui vont affecter le son, de projeter sur lui, dans le temps, l'arbitraire de la volonté. La production du son par ordinateur[2] réunit donc les conditions pour que puisse se développer une véritable *écriture* portant sur le son lui-même, qui vient s'ajouter, voire s'intégrer, à la composition de la structure musicale « classique ».

Les deux formes de composition ne sont évidemment pas exclusives : les sons composés sont à leur tour combinés pour former des structures musicales plus complexes. Vue sous cet angle, la composition du son est une formidable extension de la liberté du compositeur. En effet, celui-ci devait jusque-là se contenter des sons de l'orchestre qui, bien que constituant déjà un territoire d'investigation immense, n'étaient que peu accessibles à son écriture. Pour le compositeur, le son passe ainsi du statut d'*étant donné* à celui de *construction* ; il devient un matériau qu'on peut façonner, tester, sélectionner ou rejeter, tout comme le sont les valeurs musicales traditionnelles (durées, rythmes, notes, mélodie, etc.). Nous verrons (§ 4.5.3) que de nombreux environnements de création musicale proposent les outils permettant de lier la composition sonore et la composition de la structure musicale ; le développement de ces outils pose le délicat problème de l'articulation entre la représentation symbolique utilisée pour la composition structurelle et les différentes représentations possibles au niveau sonore (dont la représentation la plus concrète, c'est-à-dire le signal numérique lui-même) [Bresson 2007].

2.3. Les langages musicaux

Nous avions jusqu'à présent séparé les applications de production sonore des applications de composition. Il apparaît maintenant que les premières permettent également de composer, bien que d'une manière très différente des secondes. Faut-il pour autant abolir la frontière que nous avions établie ? En réexaminant la situation, il est évident que cela n'est pas nécessaire. En effet, ces applications ne se placent pas du tout au même niveau conceptuel ; les environnements de production sonore sont basés sur les concepts permettant de décrire la synthèse ou le traitement du son – des notions algorithmiques ou mathématiques souvent issues du traitement du signal – tandis que les environnements de « composition pure » utilisent un langage dérivé de celui de la théorie musicale (notes, durées, rythmes, intervalles, etc.). La distinction se situe donc clairement au niveau des *langages* mis en œuvre par les applications. Nous avons d'un côté des langages « concrets » (l'adjectif étant ici utilisé dans le même sens que dans l'expression « musique concrète ») qui décrivent plus ou moins

[2] Ce propos s'étend également aux machines analogiques, dont les possibilités en matière d'écriture sonore et musicale ont été largement explorées dans les années 50 par l'école de Cologne et en particulier par Karlheinz Stockhausen.

directement des phénomènes sonores et, par opposition, des langages « abstraits » décrivant des structures musicales sans y attacher de sons.

Comme le remarquait déjà Mathews en 1969 [Mathews 1969], l'un des « deux problèmes fondamentaux en synthèse sonore » (mais aussi dans l'informatique musicale toute entière) est « le besoin d'un langage simple, puissant permettant de décrire une séquence complexe de sons ». En effet, le langage associé à une application définit ce qu'il est possible de faire avec elle et, surtout, comment on peut le faire. Il est aisé de définir un langage doté d'une grande capacité d'expression, mais il est beaucoup plus difficile de faire en sorte que cette expressivité soit accessible aux utilisateurs et facile à contrôler.

2.4. De la dichotomie au continuum

Si nous avons jusqu'à présent travaillé sur une typologie simpliste, c'est avant tout pour montrer l'existence, au sein de l'informatique pour la création musicale, de deux courants forts et indépendants, historiquement issus de deux expériences fondatrices. Cependant il arrive que composition du son et la composition de la structure musicale « abstraite » se rencontrent ; c'est ici qu'apparaît le continuum d'applications que nous évoquions précédemment.

En effet, un certain nombre d'environnements informatiques de création musicale cherchent explicitement à concilier ces deux aspects, dans l'espoir que l'absence de rupture entre les différents niveaux facilite et fertilise le processus de création. Ces systèmes, comme FORMES [Rodet&Cointe 1984], The Patcher [Puckette 1988] (qui donnera naissance à Max/MSP quelques années plus tard), GENESIS ou OpenMusic [Assayag&al. 1997 ; Bresson 2007] ont la particularité de pouvoir supporter seuls le processus de composition dans son ensemble ; le compositeur évite ainsi d'éparpiller ses efforts dans des allers-retours entre différentes applications nécessitant chacune un apprentissage spécifique. Chaque environnement de ce type se situe en un point précis du continuum, mettant plutôt l'accent sur l'un ou l'autre des deux pôles. Chacun propose son propre langage, se prêtant plus ou moins bien à la composition sonore ou à la composition structurelle, mais permettant dans tous les cas d'établir des relations – voire des interactions – entre le niveau structurel abstrait et le niveau sonore.

L'informatique pour la création musicale nous place donc face à un foisonnement d'approches, allant de la synthèse sonore à la composition de structures musicales en passant par tous les intermédiaires imaginables. Pour présenter et étudier ce corpus, nous nous concentrerons donc d'avantage sur les grandes problématiques liées à la conception et à l'utilisation des environnements informatiques de création musicale que sur les différentes catégories d'approches techniques. Par commodité, nous séparerons la composition sonore de la *composition structurelle*, dénomination que nous attribuerons désormais à la réunion de la composition abstraite et de la création des relations entre la structure abstraite et le niveau sonore.

3. Composer le son

3.1. Economiser

En même temps que le problème de la définition des langages musicaux, Mathews soulevait celui de la génération des données destinées à constituer les sons *via* le convertisseur numérique – analogique. Si on peut penser avec Julius Smith [Smith 1991], que ce problème a été en grande partie résolu grâce à la montée en puissance constante des ordinateurs, formulée empiriquement par la loi de Moore, il est

néanmoins important de se pencher sur les conséquences, parfois inattendues, qu'il a eues sur le développement de l'informatique musicale depuis ses débuts.

3.1.1. Problèmes de mémoire

Nous nous intéresserons surtout ici aux enjeux liés à la vitesse de calcul des ordinateurs. Cependant, la limitation de la quantité de mémoire vive a également été un problème crucial, peut-être plus subtil, qui rendait l'optimisation des algorithmes absolument nécessaire – ceux-ci ne pouvant évidemment fonctionner que si leurs besoins en mémoire sont inférieurs à la quantité disponible. Les méthodes de synthèse ou de traitement touchées par cette problématique sont celles qui impliquent de grandes quantités de données, tout particulièrement la synthèse additive : de nombreux travaux ont été menés pour rechercher les meilleures stratégies de réduction de l'énorme volume d'information constitué par les fonctions d'évolution, en amplitude et en fréquence, de chaque oscillateur. Par « meilleures stratégies », il faut entendre celles qui dégradent le moins possible la qualité du son par rapport aux données initiales ; ces travaux vont donc de pair avec l'étude de notre perception du timbre en fonction de la qualité et de la quantité des données servant à le synthétiser. Voir par exemple [Gordon&Grey 1978 ; Strawn 1980 ; Sasaki&Smith 1980], ainsi que [Horner&Beauchamp 1996] pour un survol comparatif des différentes techniques.

3.1.2. Temps réel et temps différé

Dans l'ordinateur, le son est représenté sous la forme d'une suite de nombres ; il en faut 44100 pour produire une seconde de son de la qualité d'un CD. Si on excepte le cas du traitement du son, où ces échantillons sont déjà disponibles et doivent simplement être modifiés, et celui – totalement irréaliste – où on les fournit manuellement à la machine, il est nécessaire de mettre au point des méthodes automatisées pour les générer. Présentée ainsi, cette situation ne semble pas particulièrement problématique ; effectivement, des solutions furent rapidement proposées, comme la technique des tables d'ondes inventée par Mathews [Mathews 1969], la toute première méthode de synthèse sonore numérique.

La vraie difficulté provient du fait que la génération des échantillons nécessite un temps de calcul non nul et qu'il arrive que ce temps soit supérieur à la durée du son calculé ; il n'est donc possible d'écouter le résultat que lorsque tous les échantillons ont été calculés : c'est le *temps différé*. Ce cas implique automatiquement son contraire, le *temps réel*. Il s'agit pour la musique d'une situation inédite introduite par l'utilisation de l'ordinateur, conséquence directe de la représentation symbolique du son – les machines analogiques ne connaissent pas ce problème – et de la rupture du continuum énergétique qui sous-tend la relation instrumentale traditionnelle [Cadoz 1999a]. Les musiciens, comme Mr Jourdain et la prose, pratiquaient le temps réel depuis toujours et sans le savoir ; ils découvrent avec l'ordinateur qu'une autre situation est désormais possible.

La première conséquence du temps différé est l'introduction d'un délai imposé par la technologie entre la formulation d'une idée musicale ou sonore dans le langage de l'application et l'écoute du résultat. Le processus de composition s'en trouve ralenti, parfois dans des proportions considérables : certaines méthodes de synthèse pouvaient nécessiter plusieurs journées de calcul pour l'obtention de quelques minutes de son. Relativisons l'importance de ce changement pour ce qui est de la composition abstraite en rappelant qu'en dehors des nouvelles technologies, le compositeur n'a pas toujours un orchestre sous la main pour tester ses idées musicales ! En revanche, dans un contexte de recherche sonore où le son lui-même est l'objet de toutes les attentions, le temps différé peut effectivement constituer un véritable frein.

Dans tous les cas, la longueur des temps de calcul a certainement pour effet d'inciter l'utilisateur à se concentrer sur ce qu'il va demander à l'ordinateur afin de s'assurer que le résultat final correspondra à ce qu'il désirait – et ainsi éviter de gâcher de précieuses heures de temps machine.

L'autre conséquence du temps différé est l'impossibilité d'une interaction directe, aussi minimale soit-elle, avec le processus de génération sonore : une fois le calcul lancé, l'utilisateur ne peut plus intervenir sur son déroulement. Les machines analogiques – à l'exception notable du Theremin, voire du Martenot – avaient déjà considérablement dégradé la relation instrumentale, en la limitant le plus souvent au jeu sur un clavier de type piano et à la manipulation des potentiomètres et autres boutons. L'ordinateur, lorsqu'il met en œuvre une méthode de production sonore en temps différé, ne peut même plus occuper la fonction d'instrument de musique ; on ne peut en « jouer » que par l'intermédiaire de la programmation, par un contrôle à distance – dans le temps – de l'évolution du processus de génération. On a, pour le moment, perdu la possibilité d'une interaction gestuelle, avec toute la richesse de contrôle dynamique que cela comporte. On a en revanche gagné celle de se placer hors du temps d'exécution du programme, c'est-à-dire de se libérer des contraintes temporelles pour réaliser des processus d'une « complexité et d'une généralité potentiellement illimitées » [Florens&al. 1998]. Mais la phase de « conception atemporelle » peut parfaitement précéder une phase de jeu en temps réel ; il s'agit d'ailleurs de la situation de production sonore la plus générale, celle qui offre au musicien la plus grande expressivité. Elle correspond, dans une situation sans nouvelle technologie, à la succession de la lutherie et du jeu instrumental. La mise au point de méthodes temps réel, pouvant supporter une interaction gestuelle, est donc un centre d'intérêt majeur de l'informatique musicale.

3.1.3. Optimisation et temps réel

Les premières méthodes de synthèse temps réel apparaissent au cours des années 70 ; l'exemple le plus célèbre – bien qu'il n'ait pas été introduit dans cette optique – est celui de la synthèse par modulation de fréquence (FM) [Chowning1973]. La littérature est fortement marquée par les enjeux de l'optimisation des méthodes de synthèse et de la recherche du temps réel jusqu'au milieu des années 80. Ainsi, les méthodes de synthèse qui voient le jour à cette époque, comme la synthèse par « formules de sommation » [Moorer 1977], la distorsion non-linéaire[3] (ou *waveshaping*) [Arfib 1978, 1979 ; Beauchamp 1979] ou la synthèse de Karplus-Strong [Karplus&Strong 1983], sont présentées en mettant l'accent sur leur coût en temps de calcul, le plus souvent mis en balance avec la variété et la richesse des timbres qu'elles peuvent produire.

La puissance des ordinateurs croissant exponentiellement, l'obtention du temps réel est facilitée au fil des années et cette problématique perd naturellement de son importance au cours des années 90. Les techniques très coûteuses, comme la synthèse additive ou la Transformée de Fourier rapide (FFT), posent de moins en moins de problèmes de performances. La question de l'optimisation reste cependant d'actualité pour les domaines les plus demandeurs de puissance, en particulier celui de la synthèse par modélisation physique avec interaction gestuelle.

3.1.4. Etude de cas : la synthèse de Karplus-Strong

Même si la recherche du temps réel à tout prix a parfois pu masquer d'autres questions d'égale importance, elle a aussi fortement stimulé la créativité des travaux de recherche. Le cas de la synthèse de Karplus-Strong est emblématique de cette situation. Dès la fin des années 70, Kevin Karplus et Alex Strong cherchent à améliorer la synthèse par table d'onde, une méthode peu coûteuse en temps de

[3] La distorsion non-linéaire est en fait introduite dès 1969 par Jean-Claude Risset [Roads 1979], mais elle ne sera réellement développée que 10 ans plus tard.

calcul mais qui produit, par principe, des sons périodiques (aux variations d'amplitude près), donc relativement pauvres, voire ennuyeux. Leur but est, en utilisant un minimum d'opérations, de rendre la table d'onde dynamique et d'obtenir ainsi des timbres évoluant au cours du temps. Ceci illustre bien la démarche dominante de l'époque : rechercher le meilleur compromis entre le coût des méthodes de synthèses et la richesse du matériau sonore qu'elles produisent. La méthode, extrêmement simple, que Karplus et Strong appliquent alors consiste à remplir initialement la table de valeurs aléatoires puis à la lire de façon normale, mais en remplaçant chaque échantillon lu par la moyenne de celui-ci et de celui qui le précède. Ce calcul ne nécessite qu'une addition et une division : il est déjà possible, à l'époque, de la faire tourner en temps réel sur un processeur générique.

Ce que Karplus et Strong n'avaient pas prévu, c'est que les sons produits par cette méthode et ses variantes évoquent irrésistiblement certains sons instrumentaux : cordes pincées, percussions, instruments à vent. L'analyse de leur algorithme à travers la théorie des filtres numériques expliquera *a posteriori* les raisons de cette similitude avec des sons naturels ; il trouvera surtout une interprétation physique dans le cadre d'une technique plus générale qu'il a inspirée : la synthèse par guides d'onde (cf. § 3.2.6). On est face à une situation où un algorithme très simple développé dans le but de produire des sons dynamiques avec un minimum d'opérations a initié le développement de la méthode de modélisation physique la plus répandue à ce jour. Sans cette recherche d'efficacité algorithmique, la synthèse par guides d'onde aurait pu apparaître des années plus tard : c'est bien ce qu'on peut appeler une conséquence inattendue de la recherche d'économie.

3.1.5. Economie et Ergonomie

Les méthodes de synthèse les plus économes, en termes de coût de calcul ou de quantité de mémoire, sont par principe basées sur des algorithmes extrêmement simples, « resserrés », en quelques sortes, autour de l'essentiel, le phénomène oscillatoire. La synthèse FM et la synthèse de Karplus-Strong, dans leur formulation initiale, sont des exemples typiques d'une telle optimisation, à comparer avec la « débauche de moyens » nécessitée par la synthèse additive.

En raison de leur forte optimisation, ces algorithmes ne nécessitent qu'une faible quantité de données en entrée pour fonctionner. Par exemple, la synthèse FM ne comporte fondamentalement que trois paramètres de contrôle : la fréquence porteuse, la fréquence de modulation et l'index de modulation. Cette restriction du nombre d'entrées accélère la prise en main purement pratique de la méthode de synthèse, puisque le modèle mental d'interaction que l'utilisateur va construire sera relativement simple. Mais si l'espace sonore couvert avec ces quelques entrées est vaste (comme c'est le cas avec la FM et la distorsion non-linéaire), il sera difficile de savoir comment obtenir un résultat précis, et cela pour deux raisons.

La première tient dans le fait que l'optimalité peut être contraire à l'intuitivité, car elle tire parti de raisonnements abstraits et sophistiqués qui masquent la nature des phénomènes sous-jacents. Ainsi, l'utilisateur de la FM ne sait pas, dans un premier temps, comment mettre en relation les valeurs des trois paramètres cités et les résultats sonores, parce que ceux-ci ont un lien très complexe (*via* les fonctions de Bessel [Chowning 1973]) avec les propriétés du son qu'ils définissent.

Pour illustrer la deuxième raison, prenons l'exemple du contrôle d'une grue sur un chantier. Avec seulement deux paramètres (rotation et déplacement du crochet), elle permet d'atteindre n'importe quel point dans un rayon égal à la longueur de la flèche. Plus cette longueur est importante, plus l'effet d'une rotation d'un angle constant sera grand en bout de flèche : on perd donc en précision. De même, plus l'espace sonore couvert par une méthode est important et plus l'effet d'une variation des paramètres le sera. Le cas de la grue est particulier, puisque ses deux paramètres sont *orthogonaux*, ce

qui revient à dire, schématiquement, que chacun a une influence sur une seule dimension de la situation – la grue ne tourne pas lorsque le crochet se déplace – et qu'il n'existe pas plusieurs combinaisons de paramètres donnant le même résultat. Le son est, quant à lui, un phénomène fortement multidimensionnel [Monro&Pressing 1998]. Si on y accède à travers un nombre de paramètres trop petit – comme c'est clairement le cas avec la FM – ces paramètres ne peuvent pas être orthogonaux : chacun agit sur plusieurs dimensions du timbre à la fois, si bien qu'il peut être très difficile de comprendre ce qu'on fait en faisant varier un paramètre, de prévoir les effets d'une variation ou de déterminer quels paramètres il faut prescrire pour obtenir un résultat défini a priori.

Nous reviendrons sur cette problématique lorsque nous définirons l'*ergonomie* d'une méthode de production sonore. Concluons simplement pour l'instant en disant que la recherche d'optimisation aboutit souvent à des méthodes puissantes, peu coûteuses, mais délicates à utiliser.

3.2. Animer

> *"Max and Pd allow almost anyone to synthesize uninteresting timbres almost instantly. Making interesting timbres is much more difficult and requires additional knowledge."*
>
> Miller Puckette [Puckette 2007]

Si on met de côté toutes les limitations techniques, on peut affirmer que l'ordinateur est, dans l'absolu, capable de produire *tous les sons audibles*, puisque ceux-ci sont limités à une certaine bande de fréquences. Ce constat ne peut que réjouir ceux qui se sentaient trop à l'étroit avec les seuls sons de l'orchestre. La possibilité de créer des sons inouïs exerce sur les musiciens une fascination bien compréhensible. Pour se rendre compte de l'importance de cette révolution, il faut imaginer l'excitation que ferait naître dans le domaine des arts visuels la découverte de nouvelles couleurs ! La découverte d'un matériau, avec les nouvelles possibilités d'expression qui l'accompagnent, est un évènement d'une rare importance dans tout domaine artistique. Mais, comme avec tout progrès, il nous faut prendre celui-ci avec suffisamment de recul pour que l'effet de nouveauté ne masque pas les enjeux inhérents. L'informatique musicale nous promet un espace sonore illimité et majoritairement inconnu : que nous apprennent donc les premières « explorations » de cet espace ?

3.2.1. Une prise de conscience

Les pionniers de la synthèse sonore se rendent rapidement compte que les sons qu'ils obtiennent sont très insatisfaisants d'un point de vue musical. Lorsqu'il arrive aux Bell Labs en 1964, Jean-Claude Risset découvre une situation qu'il décrit en ces termes : « on ne savait tirer parti de ce potentiel illimité : on n'arrivait à fabriquer que des sons ternes, mornes, sans identité ni présence » [Risset 1999]. Même si on se « contente » d'essayer d'imiter les sons instrumentaux, les manuels d'acoustique des instruments ne suffisent pas : les recettes qu'on en tire ne contiennent pas l'essence de ce qui anime les sons naturels.

L'histoire de la synthèse sonore numérique commence donc par une prise de conscience quelque peu amère : alors que tous les sons imaginables peuvent désormais être produits, ce qui constitue une possibilité inédite et passionnante, les sons intéressants d'un point de vue musical, ceux qui « parlent » à notre oreille, semblent en revanche difficilement accessibles. Le territoire à explorer est immense et nous ne disposons pas encore des chemins permettant de le parcourir ; faute d'expérience et de connaissances, nous ignorons où et comment chercher les « pépites » sonores qui doivent s'y trouver.

Une fois ce constat établi, le véritable enjeu de la synthèse sonore apparaît clairement : pour exploiter le potentiel de l'ordinateur, il faut comprendre ce qui fait qu'un son naturel est « animé », « vivant », et arriver à reproduire ces caractéristiques par le processus de synthèse. La tâche est importante ; elle

implique l'analyse des sons instrumentaux – voire des instruments eux-mêmes –, l'étude de notre perception auditive et le développement de nouvelles méthodes de synthèse ou de nouveaux savoir-faire liés à celles qui existent déjà. Heureusement, l'ordinateur est une aide précieuse dans ce processus, en jouant le double rôle de générateur de son et d'outil d'étude d'une précision inégalée.

3.2.2. Qu'est-ce qu'un son « vivant » ?

Pour réussir à synthétiser des sons que nous qualifions subjectivement de « vivant », il nous faut découvrir les phénomènes objectifs que ce terme recouvre. Nous pouvons pour cela, avant même de passer à l'analyse scientifique, partir des sons « ternes, mornes » dont parle Risset, et essayer de préciser ce qui semble leur faire défaut. Globalement, on peut reprocher à ces sons leur manque de *dynamisme* : ils n'évoluent pas ou trop peu, ce qui a pour conséquence de lasser l'oreille. Nos sens ont en effet la particularité d'être particulièrement sensibles au changement ; une stimulation constante n'apporte pas d'information nouvelle et a donc tendance à être ignorée par notre système perceptif et cognitif. Par exemple, nos vêtements sollicitent en permanence notre sens tactile, mais nous en avons rarement conscience car ce stimulus ne nous apprend déjà plus rien quelques secondes après nous être habillés. Il en est de même pour ces sons de synthèse insatisfaisants : produits par un processus algorithmique régulier (lecture d'une table d'onde, variations d'un oscillateur), ils sont trop constants, trop mécaniques, trop « lisses », pour interpeller notre oreille durablement, surtout si ce processus est simplifié à l'extrême par souci d'optimisation. Comme l'écrit Dexter Morrill, « l'expérience nous a déjà montré que les sons électroniques simples ayant un spectre fixe deviennent inintéressants dès que *l'oreille s'est habituée à eux.* » [Morrill 1977].

Les sons de synthèse doivent donc varier dans le temps pour présenter un véritable intérêt ; mais que faut-il faire varier exactement ? L'une des premières idées à été de faire varier l'*amplitude* du signal, pour recréer les phases d'attaque, de maintien et de décroissance des sons naturels : il n'y a en effet rien de plus artificiel qu'un son d'intensité constante qui commence et s'arrête brutalement. Cela est cependant loin d'être satisfaisant. Il paraît ensuite évident d'essayer de faire varier deux autres propriétés du son : la hauteur et le spectre.[4] En réalisant l'analyse objective de sons instrumentaux, on constate en effet qu'aucun d'entre eux, même celui du diapason le mieux conçu, n'a une hauteur et un spectre strictement constants (cf. par exemple [Moorer&al. 1978] pour une analyse de la trompette). C'est en revanche le cas pour tous les sons de synthèse lorsque ces variations ne sont pas introduites volontairement, puisque les tables d'ondes et autres oscillateurs sont justement construits dans un souci de régularité et de précision. L'analyse des sons instrumentaux montre également que ceux-ci contiennent une composante bruitée plus ou moins importante selon le type d'instrument, parfois fortement présente comme pour certains instruments à vent. Dans l'article déjà cité, Morrill résume la situation ainsi : « un spectre dynamique évoluant dans le temps, le vibrato, le *portamento* et une certaine quantité de bruit aléatoire sont souhaitables dans beaucoup de types de sons synthétiques non naturels ».

Nous savons désormais qu'un son de synthèse touchera certainement plus l'oreille s'il est dynamique, c'est-à-dire si ses propriétés connaissent des variations significatives. La périodicité stricte des premiers sons obtenus avec l'ordinateur est clairement le cas à éviter ; la possibilité de créer des sons dynamiques devient un critère d'évaluation majeur des méthodes de synthèse.

La question se pose maintenant de savoir comment faire varier les paramètres et comment les lier, éventuellement, entre eux. C'est justement ici, dans la recherche de relations originales et l'exploration

[4] On parle souvent d'un quatrième paramètre, la durée ; nous la considérons ici comme un simple effet de la variation d'amplitude.

poussée des possibilités offertes par la méthode de synthèse choisie, que la créativité du musicien a sa place. Ce travail peut tout à fait être réalisé en dehors de toute référence aux sons naturels, mais il a cependant tout intérêt à s'appuyer sur l'étude des sons instrumentaux, ceux-ci étant des « balises » solidement plantées dans l'espace sonore, des points de référence autour desquels la composition sonore va pouvoir se développer.

3.2.3. L'imitation des instruments acoustiques

La plupart les synthétiseurs commerciaux actuels, qu'ils soient logiciels ou matériels, sont livrés avec une grande quantité de « sons instrumentaux » utilisés pour remplacer des instruments réels dans un arrangement musical. Ces sons sont, en général, produits par des techniques sophistiquées de lecture d'échantillons, l'accent étant mis sur deux aspects particuliers :

- La quantité et la qualité des échantillons disponibles : pour chaque instrument proposé, on tend vers l'enregistrement de chacune des notes qu'il peut produire, et ce pour chacun de ses modes de jeu, avec différents placements des microphones… Par exemple, la taille d'une banque d'échantillons pour un seul piano peut facilement dépasser le gigaoctet.
- L'expressivité du jeu des sons, avec des efforts particuliers accordés à la prise en compte de la vélocité de jeu et à l'articulation des sons.

Dans ce contexte, il est aisé d'oublier que l'imitation des instruments visait à l'origine un objectif bien différent : elle servait en premier lieu à explorer et à démontrer l'étendue des possibilités d'une méthode de synthèse donnée [Moorer 1977]. En effet si une méthode est capable de s'approcher des sons des instruments, voire de celui de la voix[5], alors on sait qu'elle pourra générer des sons non réalistes suffisamment riches pour toucher l'oreille.

Par ailleurs, la recherche de sons imitant des instruments traditionnels aboutit au développement d'un ensemble de connaissances (stratégies d'utilisation, valeurs typiques de paramètres, etc.), spécifiques à la méthode de synthèse choisie et à la famille d'instruments visée. En effet, lorsqu'une méthode de synthèse est inventée, son « mode d'emploi » n'apparaît pas en même temps ; l'imitation d'instruments acoustiques constitue alors un angle d'approche fiable pour développer les savoir-faire liés à cette méthode.[6] Ces connaissances pourront par la suite être mises à profit, non plus pour imiter, mais pour créer des sons inconnus à partir d'une extrapolation de ceux étudiés, en conservant justement les qualités qui rendent ces derniers vivants.

Sans aller jusqu'à l'imitation d'instruments acoustiques, il est possible de chercher à produire des sons « acoustiquement viables », c'est-à-dire des sons qui présentent certaines des caractéristiques dynamiques courantes des sons naturels, sans que leur timbre n'évoque pour autant un instrument ou un objet précis. La « viabilité acoustique » peut être définie par un certain nombre de relations dynamique entre les différents paramètres du son (hauteur, amplitude, timbre, enveloppe) qu'on observe communément dans les sons instrumentaux. [Beck 2000]. Il s'agit règles qualitatives ayant chacune une cause physique. Celle-ci peut être étudiée soit à un niveau très général, en considérant

[5] La voix, chantée ou parlée, est certainement « l'instrument » le plus difficile à imiter de façon réaliste : d'une part parce que notre oreille est encore plus critique avec elle qu'avec les instruments acoustiques, puisque nous l'entendons en permanence ; d'autre part en raison de la complexité (notamment au niveau de l'articulation) et de la variété incroyable des sons qu'elle peut produire. Parvenir à produire des sons imitant correctement la voix est donc un gage de puissance et de qualité pour une méthode de synthèse. C'est par exemple ce qui justifie l'orientation initiale du fameux moteur de synthèse CHANT [Rodet&al. 1984].

[6] On s'aperçoit alors fréquemment que la méthode est mieux adaptée à l'imitation de certaines familles de sons qu'à d'autres.

l'ensemble des instruments (mais de façon peu rigoureuse), soit, avec beaucoup plus de précision, au niveau de chaque instrument ou famille d'instruments.

Voici quelques unes de ces relations :

- Le timbre est d'autant brillant que l'amplitude du son est élevée (cf. l'exemple de la trompette ci-dessous).
- Les harmoniques aigües s'atténuent plus rapidement que les harmoniques graves.
- Les phases d'attaque sont généralement plus courtes lorsque l'amplitude est importante ; elles sont, par ailleurs, plus riches en composantes bruitées que le reste du son.
- Le spectre varie selon la hauteur du son.

Ces relations peuvent constituer des principes de conception utiles pour la composition sonore. En effet, les sons « acoustiquement viables » sont perçus comme moins artificiels, plus vivants, puisqu'ils respectent certains principes propres aux sons instrumentaux naturels. La production de tels sons est l'un des objectifs de la synthèse par modélisation physique (cf. § 3.2.6).

3.2.4. Analyse et synthèse

L'imitation des sons naturels serait une tâche difficile et laborieuse si on ne disposait d'outils d'analyse. Ceux-ci permettent de déterminer, à partir d'un son donné des informations objectives qui le caractérisent dans un certain formalisme et qui peuvent être utilisées pour le re-synthétiser plus ou moins exactement en inversant le processus d'analyse. Le formalisme le plus répandu est celui de l'analyse de Fourier qui offrent l'avantage d'une certaine intuitivité dans les concepts – sinon dans les outils mathématiques. Il en existe d'autres, comme l'analyse en ondelettes [Kronland-Martinet 1988], en « gaborettes » [Arfib&Delprat 1993], en fonctions de Walsh [Rozenberg 1979] ou des techniques plus « exotiques » issues de l'étude des systèmes dynamiques (cf. par exemple [Röbel 2001]). Ces approches mettent généralement en œuvre des concepts moins intuitifs et sont donc difficilement accessibles aux musiciens ne disposant pas d'une formation scientifique suffisante.

Utilisée dans l'optique de la synthèse sonore, l'analyse permet de déterminer les données à fournir en entrée de l'algorithme de synthèse correspondant pour générer un son proche de celui qui a été analysé. La différence entre le son d'origine et le son produit provient de la relation entre les données de l'analyse et les paramètres de la méthode de synthèse. Lorsque celle-ci est directe, comme c'est par exemple le cas avec le vocodeur de phase [Dolson 1986], le son re-synthétisé sera quasiment identique à celui d'origine. Dans le cas contraire, la correspondance entre les données d'analyse et les paramètres de synthèse n'est pas immédiate ; une phase de « traduction » se révèle nécessaire. Il faut en particulier « analyser » la méthode de synthèse elle-même afin d'établir le lien entre ses paramètres et les données d'analyse du son correspondant.

Pour illustrer notre propos, prenons le cas désormais célèbre de la synthèse de la trompette. Risset s'est attaché, aux Bell Labs, à imiter cet instrument à l'aide de la synthèse additive. L'analyse, sous forme de spectrogrammes, de sons enregistrés fournissait directement les données permettant de reconstituer exactement ces sons par synthèse, puisque dans ce cas, analyse et synthèse sont très fortement liées. Mais Risset cherchait à comprendre ce qui caractérise précisément les sons cuivrés ; il découvrit alors que ceux-ci présentent un enrichissement du spectre dans les aigus lorsque l'intensité augmente. Cette relation entre l'intensité et la richesse spectrale est le trait caractéristique qui était recherché ; elle pouvait dès lors être appliquée dans d'autres méthodes de synthèse, ce qui fut fait quelques années plus tard avec la synthèse FM [Chowning 1973 ; Morrill 1977]. Mais cette méthode, contrairement à la synthèse additive, ne peut pas être mise directement en correspondance avec des données spectrales. Il

faut pour cela analyser son principe même, grâce aux fonctions de Bessel, ce qui permet de déterminer que l'index de modulation contrôle justement la brillance du son, tandis que le rapport entre la fréquence porteuse et la fréquence de modulation permet d'ajuster la qualité du spectre (harmonicité / inharmonicité, harmoniques paires / impaires) [Truax 1977]. Il « suffit » dès lors de lier l'index de modulation à l'enveloppe d'amplitude pour obtenir des sons évoquant les cuivres – mais ne pouvant certainement pas être confondus avec eux.

Il faut souligner un aspect important de la méthode employée par Risset pour imiter la trompette. Les données d'analyse peuvent être modifiées puis utilisées pour créer un nouveau son, qui est alors comparé à celui d'origine. Le cycle modifications–resynthèse–écoute permet progressivement de dégager du son « les aspects pertinents pour l'auditeur » [Risset 1999], ceux qui déterminent son identité. Cette approche, *l'analyse par synthèse*, a une importance considérable en informatique musicale : grâce à elle, on accède à l'intimité même du phénomène sonore, on peut dériver d'un seul son un nombre considérable de variantes en sachant exactement ce qui les différencie les unes des autres et ainsi comprendre par écoute et comparaison comment notre perception traite tel ou tel paramètre objectif du signal. Elle a ainsi été largement utilisée en psychoacoustique dès les années 70. Dans un contexte de composition sonore maintenant, la même approche peut être considérée comme une technique de *traitement* du son, domaine que nous allons aborder immédiatement.

3.2.5. Le traitement des sons

L'une des méthodes les plus évidentes pour produire des sons riches et vivants consiste à partir de sons existants présentant déjà ces qualités et de les modifier. Les compositeurs ne s'y sont pas trompés : nombreux sont ceux qui utilisent les méthodes de traitement dans la composition de leurs pièces, qu'il s'agisse du traitement en temps réel de sons produits par des instruments ou en temps différé de sons enregistrés. Cet engouement s'explique par deux facteurs. D'un point de vue « pratique » tout d'abord : un processus de composition se basant sur un matériau sonore riche, connu, bien délimité, a de plus grandes chances d'aboutir à un résultat satisfaisant et relativement prévisible qu'un travail mettant en œuvre une méthode de synthèse, dont la maîtrise nécessite souvent un long apprentissage et face à laquelle le compositeur peut se sentir relativement perdu, en manque des repères musicaux classiques. D'un point de vue compositionnel, ensuite : un compositeur écrivant fréquemment pour instruments traditionnels aura certainement plus de facilité à articuler son discours musical à l'aide de sons proches de ceux de l'orchestre – y compris la voix – qu'avec un matériau sonore totalement synthétique.

Comme nous l'avons déjà dit, on entend par traitement du son la modification d'un matériau sonore déjà disponible. Cette opération est réalisée soit sur le signal sonore lui-même, comme c'est le cas pour le filtrage et une grande partie des effets audionumériques les plus courants (distorsion, délai, *flanger*, etc.), soit, après une phase préalable d'analyse, sur une représentation alternative du signal (le plus souvent sa transformée de Fourier).

Les traitements sonores sont extrêmement diversifiés, leur seul point commun étant de permettre la création d'une famille de sons à partir d'un seul signal enregistré initial. Il est difficile de les catégoriser, nous nous bornons donc à en citer quelques uns parmi les plus répandus :

- Le filtrage (au sens commun du terme) modifie l'importance d'une ou plusieurs bandes de fréquences du son.
- La réverbération simule l'effet de la réflexion des ondes sonores dans un espace physique, permet la spatialisation de sources virtuelles et exerce ainsi une influence considérable sur la *présence* du son. La réverbération peut être, entre autres, obtenue par un filtre numérique [Moorer 1977], mais aussi par modélisation physique [Rocchesso 1995].

- Le changement d'échelle temporelle (ou *time-scaling*), qui modifie la durée du son sans toucher à sa hauteur ni – si possible – à son spectre.
- La transposition (ou *pitch-shifting*) qui, comme son nom l'indique, transpose un son sans modifier sa durée.
- L'hybridation, parfois appelée synthèse croisée, combine (au moins) deux sons pour en obtenir un troisième, par exemple en appliquant l'enveloppe spectrale du premier au spectre du deuxième. Cet effet, souvent utilisé pour « faire chanter » un instrument à partir d'une voix, a été utilisé de façon originale par Risset dans sa pièce *Sud* (1985). C'est également l'hybridation, à l'aide du vocodeur de phase, qui a permis de recréer la voix de castrat pour le film *Farinelli* [Rodet&al. 1995].

Ces trois derniers traitements exercent une certaine fascination sur les musiciens, sans doute parce qu'ils permettent d'une certaine façon d'opérer une « manipulation du réel » qui trouve immédiatement une résonance dans notre esprit. Contrairement au filtrage et à la réverbération, ils sont strictement irréalisables sans l'aide de l'ordinateur. Le *time-scaling* est particulièrement frappant car il offre la possibilité inédite d'agir sur le passage du temps – et uniquement sur lui, contrairement à ce que permet l'enregistrement sur bande ou sur disque – réalisant ainsi un rêve sans doute inscrit au plus profond de chacun de nous. Notons que la plupart des méthodes d'analyse-synthèse autorisent les trois opérations (en plus des articles déjà cités à propos de ces méthodes, cf. par exemple [Serra&Smith 1990]). La synthèse granulaire propose également le *pitch-shifting* et le *time-scaling* par « granulation » d'un son enregistré ; elle peut donc elle aussi être comptée parmi les processus de traitement sonore.

3.2.6. La modélisation physique

Nous avons jusqu'à présent restreint notre discours aux méthodes de synthèse et de traitement centrées sur la notion de signal sonore. En suivant cette approche, la création de sons riches et vivants nécessite soit, comme nous venons de le voir, de se baser sur des sons présentant déjà ces qualités qui seront analysés et ré-synthétisés ou transformés, soit de partir d'une feuille blanche pour construire « à la main », par un travail minutieux, des structures sonores présentant des évolutions complexes qui animeront le résultat final. Cette seconde démarche est dotée d'un très grand potentiel créatif, comme le prouve magistralement John Chowning dans les pièces *Turenas* (1972) et *Stria* (1978), dont tous les sons sont produits par synthèse FM. Elle présente néanmoins des difficultés intrinsèques et demande un investissement considérable.

Il existe une autre façon de synthétiser des sons, qui consiste à se détourner de la modélisation du son[7] pour se concentrer sur la modélisation d'objets et de phénomènes réels qui produisent naturellement des sons, comme les oscillations d'une corde, d'une peau de tambour ou d'une colonne d'air. Cette approche, la *modélisation physique*, propose donc de simuler à l'aide d'algorithmes numériques la *source* du son. Son intérêt est évident si nous nous rappelons que les sons décrits comme « riches », « vivants », « dynamiques », sont justement produits par de tels mécanismes, qu'ils soient à l'œuvre dans des objets dont c'est la finalité (les instruments de musique) ou non ; c'est là un des enseignements majeurs de la psychoacoustique. Comme le montrent, entre autres, les illusions auditives mises au point par Risset, l'oreille n'est pas un analyseur de signal (même s'il y a indiscutablement un lien entre le spectrogramme d'un son et la sensation que fait naître sa

[7] La représentation du son par un signal numérique et par différentes transformées (de Fourier, en ondelettes, etc.) peut effectivement être considérée comme une *modélisation* de celui-ci.

perception) : notre système auditif cherche en premier lieu à *identifier des causes* plausibles dans les sons qui lui parviennent, car il s'agit de sa fonction primitive [Cadoz 1991]. S'il y a bien une cause dans le son produit par une table d'onde ou un oscillateur, celle-ci n'est généralement pas accessible en raison de sa nature artificielle. Ainsi, en se concentrant exclusivement sur le signal, on risque tout simplement de passer à côté de ce que l'oreille *sait* entendre.

L'une des promesses de la modélisation physique est donc, par le biais d'un retour à la *causalité* perdue lors de l'introduction du numérique [Cadoz 1991], de produire des sons naturellement parlants pour notre oreille, des sons dont les différentes dimensions sont liées de façon cohérente par la « physicalité » du processus qui les a engendrés. La réintroduction de la source sonore a un inconvénient par rapport à l'approche signal : l'objet vibrant simulé est un système qui a « ses propres raisons », qui ne se laisse influencer que par certains moyens de contrôle bien définis. Par conséquent, la modélisation physique nous prive du contrôle absolu sur le son propre aux approches basées sur le signal. Le renoncement à la possibilité de composer le son dans ses moindres détails est le prix à payer pour accéder à la richesse des timbres produits par modélisation physique.

Le propos initial de la modélisation physique n'est pas de reproduire à la perfection l'ensemble des instruments acoustiques, même si une grande partie des travaux réalisés avec cette approche de la synthèse sonore est menée dans ce sens (cf. par exemple [Smith 1996]). L'intérêt de cette démarche pour la création musicale proprement dite est relatif si on considère la quantité énorme de travail qu'elle nécessite pour arriver à des résultats qu'on peut obtenir naturellement avec des instruments. Si on cherche à imiter les instruments, ce devrait être avant tout pour les étudier et ainsi améliorer notre compréhension de leur acoustique et pour produire de nouveaux sons apparentés aux sons instrumentaux, en réalisant des modifications sur les modèles, de la même manière qu'on modifie les données intermédiaires en analyse-synthèse.

La modélisation physique est capable, comme l'approche signal, de créer des timbres inouïs et de stimuler notre curiosité sonore. On parle ainsi souvent de construire des instruments irréalisables dans le monde physique, comme la flûte virtuelle longue de 20 pieds utilisée par Paul Lansky dans *Things She Carried* (1996) [Chafe 2004]. Il est également possible de simuler des instruments qui changent de forme ou de taille pendant le jeu [Penttinen&al. 2001 ; Tache 2004], ce qui aura naturellement pour effet de faire évoluer dans le même temps la hauteur ou le timbre des sons qu'ils produisent. En allant encore plus loin, on peut s'engager dans une exploration totalement libre des possibilités de la modélisation physique en décidant de renoncer totalement à l'imitation des structures vibrantes naturelles pour exploiter les aspects non physiques que chaque système de modélisation introduit nécessairement.[8] Le système CORDIS-ANIMA permet ainsi de construire, à l'aide des liaisons non linéaires, des objets sans signification physique évidente. On est alors tenté de dire qu'en procédant de la sorte, on risque de perdre ce qui fait tout l'intérêt de la modélisation physique : le lien entre le modèle et une certaine réalité physique. Cette remarque est justifiée dans des cas « extrêmes » – par exemple si l'on en revient à une approche signal, ce qui est possible avec CORDIS-ANIMA – mais on peut dire que ces expérimentations conservent généralement l'élément essentiel garantissant la qualité des résultats sonores, la causalité, garante de la « viabilité acoustique » des sons produits.

La modélisation physique est un domaine de l'informatique musicale à part entière. Les catégories de techniques de synthèse sonore faisant partie de cette approche sont aujourd'hui nombreuses et diversifiées ; [Välimäki&al. 2005] les présente de façon détaillée et introduit les principales

[8] Comme toute forme de représentation, la modélisation opère à la fois une réduction de la réalité et une introduction de nouvelles propriétés, qui sont porteuses d'un potentiel créatif.

problématiques qui leur sont liées (cohérence énergétique, stabilité, modélisation des non linéarités et des variations dynamique, etc.).[9] Si toutes modélisent la source du son plutôt que le son lui-même, le niveau conceptuel auquel elles se placent et les outils qu'elles utilisent sont rarement les mêmes. Par exemple, tandis que la synthèse par guides d'onde [Smith 1992] se concentre sur la modélisation, à l'aide de lignes de délais et de filtres numérique, des *ondes* qui se propagent dans un medium donné, la synthèse modale [Adrien 1988] se base sur le calcul des modes de vibrations des objets matériels, et la modélisation physique masses-interactions[10] (CORDIS-ANIMA, TAO [Pearson&Howard 1995], Cymatic [Howard&al. 2002]) s'intéresse à la construction d'objets virtuels constitués de modules physiques élémentaires (« masses », « ressorts », « frottements ») liés entre eux. Dans ce dernier cas, les comportements de haut-niveau (propagation d'ondes, apparitions de modes de vibration) ne sont pas spécifiés par l'utilisateur, mais ils *émergent* de la structure des modèles et des propriétés des modules assemblés.

Ces différences d'approche ont un impact sur la modularité des modèles réalisés. Les modèles masses-interactions sont par nature modulaires, de même que les modèles utilisant la technique des *wave digital filters* [Välimäki&al. 2005, p. 35]. Ceci permet de développer des environnements de modélisation laissant une grande liberté à l'utilisateur, qui peut combiner à sa guise les différents modules élémentaires pour créer des modèles. En revanche, d'autres méthodes de modélisation, comme les guides d'ondes et la synthèse modale, sont peu modulaires dans la mesure où les objets conceptuels qu'elles manipulent ne correspondent pas directement à des objets matériels élémentaires, mais à des phénomènes physiques (ondes ou modes de vibration). Elles sont plus adaptées à la modélisation précise d'instruments complets, mis à disposition de l'utilisateur sous forme « d'instruments virtuels », comme Pianoteq (MODARTT) ou Brass (IRCAM-Arturia). L'utilisateur agit sur ces instruments par le biais de « méta-paramètres », c'est-à-dire de paramètres qui ne sont pas directement ceux du modèle lui-même mais qui sont beaucoup plus intuitifs que ces derniers.

La modélisation physique par guides d'onde est certainement la méthode ayant connu le plus grand succès (y compris au niveau commercial), notamment via les instruments virtuels que nous venons d'évoquer. Des synthétiseurs matériels ont également été commercialisés, notamment par Korg et Yamaha. Cette réussite s'explique d'une part par le fait que cette technique est suffisamment efficace pour réaliser la synthèse en temps réel, et d'autre part par le réalisme et l'expressivité des sons obtenus, qualités qui correspondent aux attentes actuelles d'une large partie du public vis-à-vis de la synthèse sonore. De plus, les méta-paramètres sont généralement conçus de façon à ce que les instruments virtuels soient faciles à prendre en main, ce qui est évidemment un autre facteur de succès. En ce qui concerne la modélisation physique masses-interactions, elle n'a semble-t-il pas encore eu d'application commerciale ; elle est toutefois régulièrement mise en œuvre dans des créations musicales. Comme nous aurons l'occasion de le souligner, sa modularité implique des difficultés dans la pratique – même si la compréhension complète de ses concepts fondamentaux est probablement bien plus facile que pour la plupart des autres techniques de modélisation physique. Différents environnements de modélisation ont été développés, en particulier TAO et Cymatic [op. cit.], qui se caractérisent par une modularité restreinte, les objets élémentaires et les interactions à la disposition de l'utilisateur étant déjà d'une certaine complexité. Signalons également le développement pour Pure Data d'une collection d'objets, nommée pmpd, qui permet la simulation en temps réel (à un taux

[9] Notons également qu'une tendance récente consiste à hybrider différentes techniques de modélisation au sein d'un même modèle, en utilisant pour chaque partie de celui-ci la technique la plus précise ou la plus efficace [Välimäki&al. 2005, p. 54].

[10] Cette catégorie de techniques est souvent appelée *modélisation physique particulaire* ou *modélisation physique masses-ressorts*.

d'échantillonnage suffisant pour la visualisation et non pour l'écoute[11]) de modules physiques élémentaires : masses ponctuelles, ressorts et frottements [Henry 2004]. Ces objets sont cependant loin de constituer un véritable environnement de modélisation, car aucune des fonctionnalités spécifiques et indispensables à la modélisation physique masses-interaction (comme l'analyse modale des structures virtuelles) n'est disponible. GENESIS est actuellement le seul environnement complet de modélisation physique masses-interaction. La construction des modèles y est réalisée, comme nous le verrons dans le Chapitre 1, avec une modularité « totale » et une prise en compte générale des non linéarités. Ces deux facteurs permettent de construire une grande variété de modèles physiques.

3.3. Contrôler

Les méthodes de production sonore par ordinateur sont des algorithmes disposant d'au moins une *sortie* (le son calculé), mais aussi d'*entrées*. Les données fournies à ces entrées déterminent le déroulement du processus interne et contrôlent donc le résultat final. On peut distinguer deux types de données d'entrées selon qu'elles sont spécifiées avant le début de l'algorithme (*données initiales*) ou pendant celui-ci (*données d'interaction*). Ce deuxième type prend tout son sens pour les méthodes de synthèse en temps réel. Lorsqu'une donnée n'est pas constituée d'un flux continu d'information (par exemple un son fourni en entrée d'un processus de traitement), mais au contraire de valeurs relativement constantes, on dit qu'il s'agit d'un *paramètre*. On peut par ailleurs considérer que la structure de l'algorithme est une donnée du processus de synthèse ou de traitement – on parlera de *données structurelles*.[12] Cette remarque, qui peut paraître étonnante, prend tout son sens avec des langages *modulaires* comme CSound ou CORDIS-ANIMA, qui mettent l'utilisateur dans la situation de concevoir lui-même la chaîne de production sonore.

L'ensemble de ces données détermine l'espace sonore couvert par la méthode considérée et définit le langage proposé par celle-ci. Il est évident que pour placer l'utilisateur dans les meilleures conditions possibles, ce langage doit faciliter le passage de l'idée musicale à sa réalisation concrète et minimiser la distorsion introduite entre les deux. Voilà posé, dans les termes les plus simples, le fameux *problème du contrôle*. Celui-ci n'a été complètement pris en compte que tardivement, sans doute parce que les moyens technologiques (notamment l'impossibilité du temps réel) ne permettaient pas de le poser initialement, de le formuler dans son intégralité.

3.3.1. Les niveaux de contrôle

Avant d'entrer plus complètement dans le cœur du sujet, il est important de remarquer que la notion de contrôle ne présente pas un visage unique mais recouvre différents problèmes. Elle peut tout d'abord être abordée, comme nous l'avons déjà fait, sous l'angle de la structure des algorithmes de production, que nous traitons comme une donnée et donc comme le lieu possible d'une certaine forme de contrôle. Par ailleurs, on peut, avec Giovanni De Poli [DePoli 1996] opérer une double distinction (i) entre le contrôle effectué en temps différé, « en studio », qui profite de la possibilité unique de se placer hors du temps pour composer le son avec toute la minutie voulue, et le contrôle effectué en temps réel qui tire parti de l'expressivité propre à l'interprétation ; (ii) entre le contrôle intervenant à une échelle « micro-temporelle », déterminant les qualités les plus profondes de chaque son (en particulier son spectre) et celui opérant sur des durées beaucoup plus longues, de l'ordre de la phrase

[11] Les objets pmpd communiquent par messages et non par signaux sonores, ce qui rend de fait impossible la synthèse sonore en temps réel.

[12] Cette terminologie est tirée du cours « Technologies et processus de la création musicale », donné par Claude Cadoz dans le cadre de la spécialité « Art, Sciences et Technologies » du master IC2A, organisé par les quatre universités grenobloises.

musicale. De Poli utilise pour ces deux derniers types de contrôles les expressions éclairantes de *sonological control* et *expressive control* ; cette distinction, parce qu'elle repose sur un rapport d'échelles temporelles, est cependant plus subjective que celle qui sépare les contrôles en temps réel et en temps différé.

3.3.2. Le contrôle structurel

On ne peut évidemment parler de contrôle structurel que pour les environnements qui offrent à l'utilisateur la possibilité de participer, dans une certaine mesure, à la définition de la chaîne d'opérations menant des entrées à la sortie, ce qui correspond en fait à une majorité des cas actuellement. Cependant, le contrôle structurel proposé varie énormément d'une application à l'autre. Certains synthétiseurs matériels présentent par exemple une chaîne de production fixe et les seuls choix possibles consistent à activer ou désactiver certains de ses composants, par exemple le filtre : ici, le « langage » imposé à l'utilisateur est extrêmement rigide, contraignant. La situation opposée est celle des librairies et langages de programmation musicale[13], comme SuperCollider [McCartney 1996], Nyquist [Dannenberg 1997], STK [Cook&Scavone 1999] ou encore CLAM [Amatriain&al. 2002] ; l'utilisateur est ici bien plus libre puisqu'il dispose de toute la puissance d'un véritable langage informatique, mais c'est aussi une situation plus exigeante pour le musicien puisqu'elle nécessite des compétences en programmation.

3.3.3. La modularité

> *"The only answer I could see was not to make the instrument myself – not to impose my taste and ideas about instruments on the musicians – but rather to make a set of fairly universal building blocks and give the musician both the task and the freedom to put these together into his or her instruments."*
>
> Max Mathews [Roads 1980a]

L'utilisation de langages de programmation pour la synthèse sonore fait appel à un principe plus général, la *modularité*, qui consiste à envisager le processus de production sonore comme l'action combinée d'un certain nombre de composants réalisant chacun une fonction élémentaire bien définie, les *modules*. Les modules effectivement utilisés et leur schéma d'interconnexion sont laissés à la décision de l'utilisateur. Le concepteur d'un environnement modulaire se contente de définir les types de modules disponibles et leur protocole de communication ; il met parfois à disposition les outils permettant à chacun de développer ses propres modules. C'est à Mathews qu'on doit l'invention de ce concept si important qui, fait encore plus remarquable, était déjà présent dans la série de programmes Music N, c'est-à-dire dès les débuts de la synthèse numérique [Roads 1980a].

Quel est donc l'intérêt de la modularité ? La réponse la plus immédiate à cette question est qu'un système modulaire est *ouvert*, dans le sens où l'utilisateur n'est pas restreint à un ensemble de fonctionnalités déterminées par les concepteurs mais doit au contraire définir lui-même celles qui l'intéressent parmi un ensemble limité seulement par des contraintes techniques : la modularité est un gage de généralité. L'ordinateur a cette supériorité sur les machines analogiques de pouvoir multiplier à loisir les composants virtuels et de supporter ainsi des processus d'une grande complexité.[14] Cet aspect des choses rapproche la démarche modulaire de la programmation informatique classique, tout

[13] Nous distinguons les librairies, qui reposent sur un langage informatique existant déjà (comme le C++ pour STK) des langages complets et indépendants comme SuperCollider.

[14] Il existait également des synthétiseurs modulaires (Moog, ARP, etc.), inspirés des travaux de Mathews, auxquels on pouvait ajouter de nouveaux modules (payants…) à chaque fois que le besoin s'en faisait sentir.

en préservant une certaine aisance d'utilisation, puisque les fonctions élémentaires sont déjà « empaquetées » et n'ont plus qu'à être connectées entre elles. Mais un système modulaire n'oblige en rien l'utilisateur à rechercher la complexité ; les programmes, élaborés au cas par cas, ne contiennent donc que ce qui est nécessaire à l'obtention des résultats espérés, ils ne sont pas plus complexes que le « problème » à traiter. Il s'agit d'ailleurs, historiquement, de la raison pour laquelle la modularité a été adoptée [Roads 1980a]

Le succès de l'approche modulaire ne s'est jamais démenti ; le cas de la série Music N est particulièrement probant, puisque les programmes de Mathews ont eu un nombre considérable de descendants directs (dont certains sont toujours en développement actif), parmi lesquels Mus10, Music4BF, cmusic, CMIX, Csound, etc. (cf. [Pope 1993] pour une comparaison des trois derniers). Ces langages ont gardé l'aspect temps différé original, mais ils ont des « cousins » temps réel et interactifs comme Max/MSP, Pure Data [Puckette 1996] ou encore Kyma [Scaletti 1989]. Enfin, la modularité n'est pas réservée à ce type d'environnements dont on pourrait dire, pour simplifier, que chaque module opère un traitement élémentaire sur le signal. CORDIS-ANIMA, par exemple, est également un langage modulaire, mais ses composants réalisent des « opérations » inspirées des lois de la physique et manipulent des couples force/position ou position/force en entrée-sortie [Florens&Cadoz 1990]. Par ailleurs, la modularité n'est pas l'apanage des applications de synthèse sonore : elle est également mise à contribution pour la composition structurelle, par exemple dans les environnements PWGL [Laurson&Kuuskankare 2002] et OpenMusic [Assayag&al. 1997].

3.3.4. L'ergonomie

Quittons le contrôle structurel, en considérant maintenant les techniques de production sonore comme des « boîtes noires » dont on ignore le fonctionnement interne. David Jaffe définit dix critères d'évaluation des techniques de synthèse [Jaffe 1995], dont certains concernent le contrôle des algorithmes de synthèse grâce à leurs paramètres :

1. Intuitivité des paramètres (est-il facile de comprendre leur « sémantique » ?) ;
2. Perceptibilité des variations paramétriques ;
3. Correspondance des paramètres avec des paramètres physiques (existe-t-il un lien plus ou moins direct entre les paramètres et des situations physiques ?) ;
4. Prévisibilité des effets des variations paramétriques.

Il est clair que ces critères ne sont pas totalement indépendants ; par exemple une technique dont les paramètres ont une bonne « physicalité » (critère 3), sera certainement plus intuitive (critère 1). De même, des paramètres intuitifs ont plus de chance d'avoir des effets prévisibles (critère 4). On peut finalement faire émerger de ces critères une notion plus globale, l'*ergonomie*, qui reflète la facilité avec laquelle une technique est apprise et mise en œuvre. Une mauvaise ergonomie rend la tâche de l'utilisateur délicate : il peut avoir du mal à comprendre les paramètres et leurs effets, et ainsi être contraint, au moins dans un premier temps, de les utiliser « à l'aveuglette ». La synthèse FM est l'exemple typique d'une technique dotée d'une très mauvaise ergonomie, à cause du trop petit nombre de ses paramètres par rapport à l'espace sonore qu'elle couvre et du manque d'intuitivité de ceux-ci. D'ailleurs, le nombre des paramètres n'entre pas en compte dans les critères définis par Jaffe, ce qui montre bien que cet aspect du problème n'est pas pertinent ; en effet si le modèle mental suscité par une méthode est suffisamment clair et cohérent, les paramètres y trouveront naturellement leur place quel que soit leur nombre. C'est par exemple le cas pour la synthèse additive qu'on considère généralement comme intuitive, une fois la notion de décomposition du son en composantes fréquentielles comprise, alors qu'elle peut comporter des centaines, voire des milliers de paramètres.

En revanche, lorsque les données en entrée se multiplient, on risque fort de réduire la perceptibilité de leurs variations (critère 2), ce à quoi on peut remédier en créant des méta-paramètres [Jaffe 1995].

La qualité des sons produits n'est pas le seul intérêt des techniques de modélisation physique ; elles ont aussi l'avantage unanimement reconnu d'être plus intuitives que les techniques de type signal pour la raison évidente que leurs paramètres évoquent des concepts physiques dont nous pouvons faire l'expérience au quotidien (d'où le troisième critère de Jaffe), par exemple l'élasticité, le frottement et l'inertie dans le cas de CORDIS-ANIMA. La facilité de compréhension et de mise en œuvre d'une technique est encore renforcée lorsque la présentation des modèles se fait par le biais d'une représentation visuelle évocatrice et, éventuellement, d'une interaction gestuelle. Il faut toutefois remarquer que toutes les techniques de modélisation physique ne sont pas « naturellement » intuitives. La synthèse par guides d'onde, en particulier, est fondamentalement basée sur la théorie des filtres numériques qui est loin d'être accessible à tout un chacun. Le sens physique des paramètres n'apparaît clairement qu'à travers une certaine interprétation des algorithmes ; la technique sera donc incompréhensible pour la plupart des utilisateurs si on la présente à un niveau relativement élémentaire, correspondant aux paramètres des filtres, et plutôt intuitive si on se place au niveau de l'interprétation qui masque les mécanismes sous-jacents.

3.3.5. Ergonomie et analyse

Le dixième critère défini par Jaffe est la disponibilité d'outils d'analyse. Cette question est déterminante vis-à-vis de l'utilisabilité d'un modèle de synthèse, dans la mesure où, comme nous l'avons vu, la possibilité d'utiliser les données d'analyse afin de le paramétrer est une aide précieuse pour obtenir des sons de qualité. Il est, par ailleurs, plus aisé de comprendre une méthode de synthèse lorsque celle-ci s'appuie *directement* sur le socle théorique bien établi d'une certaine forme d'analyse des phénomènes sonores : son ergonomie s'en trouve donc renforcée. C'est par exemple le cas de la synthèse additive et plus globalement des nombreuses techniques de *modélisation spectrale* qui tirent leur intuitivité du fait que la théorie de Fourier est largement enseignée – il s'agit ici de ce qu'on pourrait appeler une « intuitivité acquise ». Les méthodes dépourvues d'outils d'analyse associés (on parle parfois de *méthodes abstraites*) sont en revanche plus difficilement abordables ; ce sont d'ailleurs souvent des techniques très économiques, comme la synthèse FM, le *waveshaping* ou les différents types de synthèse par instruction [Holtzman 1979 ; Berg&al. 1980]. Remarquons que les méthodes abstraites sont en voie de disparition [Smith 1991 ; Vaggione 1996], maintenant que le besoin d'économie se fait de moins en moins pressant et que nous avons compris que nous couper totalement des sons naturels était une démarche difficile et coûteuse ; les deux principales approches de la synthèse sont actuellement la modélisation physique et la modélisation spectrale [O'Leary&Griffith 2003], car elles concilient, de façon très différente, ergonomie et richesse des sons générés.

En ce qui concerne la synthèse par modélisation physique, il existe deux catégories d'analyses. La première, qu'on pourrait appeler l'*analyse instrumentale*, consiste à effectuer des mesures expérimentales sur des instruments réels afin d'en dériver des modèles les plus fidèles possible ; elle est principalement utilisée dans la synthèse par guides d'onde (cf. par exemple [Cuzzucoli&Lombardo 1999]). Le deuxième type d'analyse, beaucoup plus difficile, tente de construire un modèle physique directement à partir de phénomènes sonores. Cette approche par *résolution du problème inverse* facilite considérablement la conception des modèles mais ne favorise pas une mise en œuvre réellement créative de la modélisation physique [Castagne&Cadoz 2003]. Des outils d'estimation de paramètres sont déjà disponibles pour la synthèse modale et sont en cours de développement pour la synthèse par guides d'onde. Dans ce dernier cas, les méthodes mises au point ne sont pas générales : elles visent chacune une catégorie bien définie d'instruments [Smith 2004]. Ceci

reflète d'une part la tendance des équipes travaillant sur les guides d'onde à concentrer leurs travaux sur la modélisation réaliste des instruments acoustiques, mais surtout l'immense difficulté théorique que représente la mise au point d'une technique capable d'appréhender l'ensemble des sons instrumentaux pour en reconstruire une source. Ce problème reste donc ouvert, mais il n'a peut-être pas de solution et il ne nous semble pas qu'il s'agisse d'une investigation prioritaire pour la création musicale proprement dite – cependant, sa résolution aurait sans doute des implications très intéressantes en psychoacoustique ou en intelligence artificielle.

3.3.6. Contrôles de haut niveau

Quelles seraient les qualités d'un modèle de production sonore idéal ? Il est probable qu'on obtiendrait autant de réponses différentes à cette question que de personnes à qui on la poserait, mais nous ne pensons pas prendre trop de risques en prédisant que la plupart d'entre elles exprimeraient, d'une façon ou d'une autre, deux idées principales :

- le modèle doit couvrir un domaine sonore riche et étendu ;
- le modèle doit permettre de traduire rapidement et sans distorsion les idées musicales en résultats sonores.

L'origine de ce deuxième souhait est évidente : si le chemin menant de l'intention initiale à la réalisation concrète se révèle trop long ou tortueux, il y a de fortes chances pour que l'utilisateur se perde en route et n'arrive pas là où il le souhaitait.[15] Dans ce cas, il est obligé de rebrousser chemin sur une certaine distance pour tenter de comprendre où il a fait fausse route, avant de pouvoir avancer de nouveau. Ces tâtonnements peuvent se révéler particulièrement décourageants, fastidieux et risquent de détourner le compositeur de l'idée musicale elle-même. Il est donc souhaitable, dans la mesure du possible, de les éviter.

Comment, alors, établir une interaction fidèle et directe entre l'utilisateur et le modèle de production ? Nous avons déjà donné une première réponse en parlant de modularité : cette approche invite le musicien à construire son propre modèle, qui reflète alors bien mieux son « modèle intérieur » – c'est-à-dire la façon dont, plus ou moins consciemment, il souhaite organiser la production du son – qu'un autre qui lui serait imposé. Cependant, la modularité ne résout pas complètement le problème ; elle le déplace en partie sur les contraintes propres au système modulaire considéré, c'est-à-dire les fonctions que réalisent les modules disponibles et le protocole d'interconnexion de ceux-ci. Ces contraintes définissent un paradigme avec lequel il est possible de ne pas se sentir à l'aise. En outre, la construction d'un modèle, par exemple un *patch* pure data, est une tâche exigeante qui n'est pas accessible à tous.

C'est donc pour tenter d'apporter une réponse plus universelle au problème du contrôle de la synthèse qu'ont été développés des systèmes de haut niveau dont on pourrait dire qu'ils tentent d'adopter un langage plus proche des préoccupations de l'homme que de celles de la machine. On espère ainsi simplifier l'interaction entre les deux et faciliter l'expression des idées de l'utilisateur. Mais on ne peut pas prétendre s'adresser plus directement à ce dernier sans tenter de comprendre ce dont il a besoin ; c'est donc logiquement que les études en psychoacoustique et plus généralement en psychologie expérimentale jouent un rôle majeur dans le développement des approches de haut niveau.

L'origine de cette démarche peut être située au cours de la deuxième moitié des années 70 avec les travaux sur la perception sonore de John Grey, John Gordon [Gordon&Grey1978], James Moorer [Grey&Moorer 1977] ou encore David Wessel [Wessel 1979]. La méthodologie de ces études

[15] Notons toutefois qu'il peut également aboutir ainsi à un résultat tout aussi intéressant que celui qu'il visait. Cette remarque ne vise pas à « promouvoir » la complexité des modèles, mais simplement à souligner qu'il ne faut pas négliger, et encore moins dénigrer, cet aspect « aléatoire » du processus de création.

fondatrices consiste globalement à faire évaluer par des sujets la ressemblance (ou *distance perceptive*) entre des paires de sons puis à déterminer, grâce à un algorithme d'analyse multidimensionnelle (*multidimensional scaling*), un espace virtuel dans lequel chaque son est représenté par un point et où les distances entre les sons correspondent le plus possible aux moyennes des distances attribuées par les sujets. Les sons présentés étaient des sons instrumentaux enregistrés, ainsi que des sons re-synthétisés (par synthèse additive) à l'identique ou modifiés. Tous les sons ayant été analysés par vocodeur de phase ou par filtrage hétérodyne, l'étude se poursuit par la comparaison des spectrogrammes avec la position des sons correspondants dans l'espace construit ; on tente ainsi d'effectuer une mise en relation entre les données subjectives et les données spectrales objectives.

L'intérêt de cette méthode est triple. Elle permet en premier lieu de rechercher des méthodes de réduction de données qui conservent bien les qualités du son d'origine. D'autre part, on tente avec ces tests de *comprendre* comment le système perceptif de l'homme « traduit » les données objectives du son en qualités perceptives, et en particulier comment se construit le timbre, notion hautement subjective, à partir du phénomène sonore concret. Enfin, et c'est là ce qui nous concerne le plus, on peut envisager d'inverser le processus et de considérer l'espace perceptif construit par les tests non plus comme un outil d'analyse, mais de contrôle de la synthèse additive (ou de tout autre méthode qu'on serait capable de paramétrer à partir d'un spectrogramme). Cette idée, plus particulièrement développée par Wessel [Wessel1979], nécessite que la correspondance entre données spectrales et perceptives puisse être formalisée de façon rigoureuse ; on disposerait alors d'une méthode de contrôle extrêmement puissante puisqu'il suffirait de choisir un point précis dans l'espace perceptif pour entendre quelques instants plus tard le son correspondant. De plus, ce choix ne se ferait pas à l'aveugle puisqu'il s'appuierait d'une part sur des dimensions ayant un sens perceptif fort et d'autre part sur les « repères » formés par les sons déjà analysés. Ne s'agirait-il pas d'une ergonomie idéale ?

Mais ne nous avançons pas trop : qu'en est-il des résultats concrets de ces expériences ? Ils montrent d'abord que la notion d'espace perceptif est cohérente ; les algorithmes d'analyse parviennent effectivement à localiser les sons dans un espace virtuel en respectant les distances issues des tests auditifs. Par ailleurs, un aspect précis des expériences affirme la consistance de cet espace : John Grey a en effet montré que si on reproduit l'étude avec des sons obtenus par interpolation des spectres originaux, les points correspondants se retrouvent placés par les sujets à des positions cohérentes dans l'espace virtuel, entre les sons dont ils sont issus. De grandes difficultés viennent cependant modérer ces résultats enthousiasmants. Les différents travaux n'aboutissent pas au même nombre de dimensions (trois pour Gordon et Grey, deux pour Wessel), ce qui peut en partie s'expliquer par les conditions expérimentales différentes et notamment par l'utilisation de différents algorithmes d'analyse des résultats des tests ; mais, chose plus importante, l'interprétation de la « sémantique » de ces dimensions reste délicate à mener, et on est loin d'aboutir à une mise en correspondance suffisamment rigoureuse des données objectives et subjectives pour pouvoir réaliser un processus inverse. Il est certain que l'identification des timbres se base majoritairement sur la répartition globale de l'énergie dans le spectre, la façon dont cette répartition évolue au cours du son et la nature de l'attaque des sons, mais ces interprétations restent relativement imprécises. D'autre part, remarquons que ces expériences ont été menées sur des sons normalisés en durée, en hauteur et en intensité. En opérant ces simplifications, on a retiré un certain nombre des dimensions du problème.

L'idée d'utiliser les espaces perceptifs comme outils de contrôle d'une méthode de synthèse n'a guère été développée ultérieurement, ce qui s'explique en partie par le fait que la psychoacoustique est une science expérimentale dont il est difficile de tirer des conclusions suffisamment précises et générales pour les mettre à l'œuvre pour la synthèse sonore. Cela ne dispense évidemment pas de continuer à

poursuivre les recherches dans cette direction. Finalement, ces travaux ont surtout été poursuivis dans le domaine de l'extraction et de la recherche d'informations musicales.

L'utilisation du langage naturel dans les interfaces est une autre voie ayant été explorée pour le contrôle de haut niveau et qui permettrait également à l'utilisateur de communiquer très rapidement et efficacement avec la machine. Schmidt a par exemple conçu un système de reconnaissance de texte [Schmidt 1987] s'interfaçant avec un environnement de création musicale préexistant [Decker&al. 1986], tandis que le système SeaWave [Ethington&Punch 1994] permettait à ses utilisateurs de décrire à l'aide d'adjectifs courants et soigneusement choisis les transformations à faire subir aux sons produits par synthèse additive (« plus brillant », « moins résonnant », etc.) et que Rolland et Pachet appliquaient la même idée aux synthétiseurs commerciaux, dans le but d'exploiter le savoir-faire des utilisateurs expérimentés [Rolland&Pachet 1996]. Si ces expériences ont abouti à des résultats encourageants, elles ont surtout montré la difficulté d'avoir recours à un moyen d'interaction aussi complexe que le langage naturel, dont le traitement automatique est un domaine de recherche extrêmement complexe où beaucoup de progrès sont encore à faire. De façon générale, ces recherches sur les contrôles de haut niveau nous apprennent, que derrière les applications fantastiques qu'elles dessinent, il y a également d'énormes difficultés aussi bien théoriques que pratiques, qui apparaissent dès qu'on essaye de comprendre ce « système » immensément complexe qu'est l'être humain. Comme dans tous les domaines qui traitent de la perception et de la cognition, il faudra beaucoup de temps et d'efforts pour que des applications pratiques réellement opérationnelles apparaissent.

3.3.7. Le contrôle gestuel

Nous avons pour l'instant à peine évoqué le contrôle expressif que nous avons défini plus haut. Ce domaine a pourtant connu d'importants progrès initiés, là aussi, par une prise de conscience générale du fait que l'exploration des nouveaux territoires sonores pouvait difficilement se faire en coupant tout lien avec les pratiques traditionnelles et plus particulièrement le jeu instrumental. L'expressivité peut être atteinte par d'autres approches – on pense en particulier aux travaux réalisés au KTH sur les règles d'interprétation [Friberg 1991 ; Bresin&Friberg 2000] – mais le canal gestuel est certainement le moyen le plus naturel et le plus riche pour la véhiculer.

Il n'est pas étonnant de retrouver les prémisses du « retour au geste » dans les travaux des pionniers de l'informatique musicale, comme Mathews avec son système GROOVE [Mathews&Moore 1970]. Mais ces expériences ne se placent pas encore dans le cadre de la relation instrumentale complète. En particulier, elles introduisent toute une série d'intermédiaires entre le corps et le processus de création sonore ; dans le cas de GROOVE, le rôle des gestes se limite au déclenchement d'évènements pré-écrits. Il s'agit déjà d'un progrès considérable par rapport à la situation la plus courante à l'époque, celle où l'interaction avec le processus de production sonore n'est possible que par programmation. Au cours des années 70, le temps réel devenant progressivement accessible, on voit apparaître de nouveaux moyens d'interaction. Le clavier de type piano est déjà le choix le plus courant, mais d'autres contrôleurs plus originaux sont parfois mis en œuvre ; par exemple, le système SYN4B dispose d'un pédalier, d'un joystick, de boutons et de *sliders* [Rolnick 1978]. Toutes ces interfaces restent encore des systèmes de commande unidirectionnels : l'information ne circule que de l'utilisateur vers la machine.

Il faudra attendre les premiers travaux de l'ACROE, à la fin des années 70, pour que le problème du contrôle gestuel soit formulé de façon complète, avec le paradigme de la simulation multisensorielle interactive. L'avancée considérable proposée par Claude Cadoz, Jean-Loup Florens et Annie Luciani réside dans la reconnaissance du fait que le contrôle le plus « intime », le plus expressif, du processus de synthèse sonore ne peut être obtenu que par la transposition de *tous les aspects* de la situation instrumentale traditionnelle, c'est-à-dire non seulement le retour visuel et sonore des actions des

l'utilisateur, mais également le retour haptique [Cadoz&al.1981 ; Cadoz&al.1984]. La conception de la relation avec « l'instrument » représenté par l'ordinateur doit prendre en compte le fait que, dans le monde physique, toute action gestuelle s'accompagne de la perception de ses effets selon les modalités visuelle, auditive et tactilo-proprio-kinesthésique et que toute perception est nécessairement active : c'est la boucle multisensorielle action-perception. On dispose déjà des transducteurs vidéo et audio, il reste à développer les transducteurs gestuels, capables de supporter le caractère bidirectionnel du canal gestuel. Leur rôle est en effet à la fois de capturer les gestes et d'agir sur l'utilisateur en réaction à ceux-ci ; ce sont les transducteurs rétroactifs (dénommés plus couramment *dispositifs à retour d'effort* ou *dispositifs haptiques*). Dès lors que la machine devient capable de réagir mécaniquement aux actions de l'utilisateur, on ne peut plus parler de contrôle, car ce terme présuppose une relation physique unidirectionnelle entre l'homme et la machine. On se trouve alors dans une situation d'*interaction* complète, comparable à celle de l'instrumentiste, qui *interagit* avec son instrument sans le « contrôler » pour autant.

Une fois ces interfaces d'un nouveau genre disponibles, il faut développer les algorithmes chargés d'assurer la cohésion des signaux visuels, sonores et gestuels. On peut prendre toutes les libertés qu'on veut et choisir librement le *mapping* effectué entre les signaux entrant et sortant de l'interface gestuelle et les paramètres de l'algorithme de production sonore.[16] La modélisation physique apparaît toutefois comme une des réponses les plus appropriées, car elle manipule des variables utilisables en tant qu'entrées/sorties d'un système mécanique – rendant donc l'étape de mapping inutile, comme c'est le cas avec CORDIS-ANIMA, ou la réduisant à une simple conversion entre deux grandeurs physiques différentes. En outre, ces variables présentent l'avantage d'être naturellement liées entre elles de façon cohérente par un processus de simulation basée sur les lois de la physique. Ces idées, que nous présentons ici très rapidement, sont basées sur une analyse profonde des mécanismes instrumentaux, de la situation instrumentale et du canal gestuel [Cadoz 1999a].

Les interfaces gestuelles sont actuellement un domaine en fort développement dans les laboratoires de recherche du monde entier, mais il a fallu près de 15 ans pour que leur intérêt soit largement reconnu. On peut avancer deux explications, probablement partielles, à cette relative lenteur. Tout d'abord, la domination presque totale du clavier de type piano dans le domaine de l'informatique musicale grand public à sans doute contribué à masquer les autres possibilités, plus expressives et mieux adaptées au contrôle de toute une classe de sons ; comment peut-on, en effet, envisager raisonnablement de contrôler l'ensemble des sons imaginables à l'aide d'une interface aussi normative et peu expressive que le clavier, même couplée à différents potentiomètres et autres rubans tactiles ? La persistance d'une telle aberration dans l'informatique musicale s'explique certainement, en grande partie, par des raisons économiques et commerciales. Par ailleurs, il est certain que la mise au point d'interfaces gestuelles, surtout à retour d'effort, suppose de relever un certain nombre de défis techniques d'une grande difficulté (problèmes de temps réel, de latence, de bande passante, etc.), défis d'autant plus délicats à surmonter si, faute d'un intérêt général, chaque équipe de recherche est obligée de développer ses propres technologies avec des moyens souvent limités. Cette situation pousse bon nombre de chercheurs à utiliser des dispositifs peu coûteux, déjà disponibles ou faciles à concevoir (comme les tablettes graphiques ou les différents types de capteurs magnétiques, à infrarouges ou à ultrasons). Cependant l'existence de réseaux de grande ampleur comme ENACTIVE [Enactive] et de conférences internationales (New Interfaces for Musical Expression, Enactive Interfaces), semble

[16] Notons que le problème du *mapping* se pose avec tout type d'interfaces, qu'elles soient haptiques ou non ; mais il est encore plus critique lorsque c'est le cas.

montrer que les enjeux du dépassement de ce premier stade, pour aller vers une réelle multisensorialité intégrant le retour tactile et/ou le retour d'effort, sont en train d'être reconnus.

3.4. Chassez le naturel…

L'ordinateur fait au musicien la promesse de mettre à sa disposition l'ensemble des sons audibles. On ne peut pas dire que cette promesse n'est pas tenue : il est même relativement facile d'écrire un programme qui génère automatiquement tous les sons possibles d'une durée donnée. Le problème qui se pose face à un territoire aussi vaste est bien celui de la perte des repères propres à la pratique musicale « traditionnelle ». Le programme que nous venons d'évoquer ne serait d'aucune utilité pour la création, car les sons réellement intéressants ne représentent qu'une infime partie de tous ceux que nous sommes désormais capables de produire grâce à l'ordinateur.

Pour réussir à exploiter le potentiel de la synthèse sonore numérique, le musicien doit alors soit accepter la démarche exigeante de partir d'une « feuille blanche », soit se tourner vers les phénomènes sonores naturels et la situation instrumentale traditionnelle. Au niveau des algorithmes de production sonore proprement dits, l'obtention de sons « vivants », « intéressants », passe par l'analyse ou le traitement de sons préexistants, ou par la modélisation physique. En ce qui concerne le contrôle de ces algorithmes, il est de plus en plus évident que le canal gestuel reste, au travers d'interfaces capables d'en véhiculer toute la richesse, le moyen privilégié pour atteindre un degré d'expressivité et une complexité dans l'articulation des sons équivalents à ceux que procurent les instruments traditionnels.

Si nous pensions pouvoir « échapper » d'une certaine façon à la réalité grâce à la synthèse sonore numérique, nous devons reconnaître que pour nous lancer dans cette exploration de manière efficace, nous avons besoin de comprendre d'où nous partons. Le naturel est revenu au galop.

4. Composer la structure musicale

La composition structurelle est, au même titre que la composition sonore, un champ d'expérimentation libre, dont les seules contraintes sont fixées par les lois de la perception et de la cognition musicales d'une part, et par les limites technologiques d'autre part. On pourrait toutefois dire que le compositeur dispose d'une plus grande liberté que le *designer* sonore, parce que nos goûts musicaux semblent moins dictés par la nature que nos « goûts sonores ».

Le compositeur se trouve alors relativement seul face aux choix musicaux qu'il doit effectuer, *a fortiori* alors même qu'aucune théorie musicale ne peut se prévaloir d'une quelconque primauté par rapport aux autres. Mais il s'agit là d'une responsabilité et d'un défi indissociables du processus même de création.

L'ordinateur est l'un des moyens permettant d'explorer cette espace de liberté. Grâce à sa puissance de calcul, il va pouvoir être le support de nombreux processus de composition structurelle, dont nous allons montrer l'extrême diversité.

4.1. De la Composition Automatique à la Composition Assistée par Ordinateur

Nous l'avons déjà dit, Hiller et Isaacson, suivis peu de temps après par Pierre Barbaud et Iannis Xenakis, sont les premiers à avoir utilisé l'ordinateur pour composer automatiquement une pièce musicale, dès la fin des années 50. Il s'agit d'une époque où l'ordinateur, inventé depuis dix ans à peine, est une machine rare, fascinante et porteuse d'immenses promesses. Son invention, qui coïncide avec

la naissance de la cybernétique (terme popularisé dès 1948 par Norbert Wiener [Wiener 1948]), inaugure une période au cours de laquelle l'informatique suscite un certain nombre de spéculations relevant parfois du fantasme anthropomorphique vis-à-vis de la machine. C'est le temps des premières simulations de réseaux de neurones et des débuts de l'intelligence artificielle, recherches réalisées dans un enthousiasme bien compréhensible et avec un espoir immense dans les possibilités des ordinateurs. Cette tendance est présente dans les premières expériences de composition par ordinateur : on envisage alors de faire de la machine l'équivalent d'un compositeur en codant en son sein les traités d'harmonie, de contrepoint ou toute autre règle de composition que l'on aura pu formuler.

On sait maintenant que les années 60 allaient être la période du retour à la réalité ; les premiers résultats des expériences menées en intelligence artificielle montrèrent en effet qu'il fallait sérieusement revoir à la baisse les ambitions générales, la pensée humaine ne se laissant pas aussi facilement « mettre en boîte » dans des programmes purement déterministes. Cette remarque s'applique aussi aux travaux de composition automatique de Hiller et Isaacson : l'ordinateur, suivant scrupuleusement les règles qu'on lui fournissait, produisit effectivement des partitions, mais cela ne fit pas de lui un compositeur : les résultats se révélèrent particulièrement pauvres, sans âme – tout comme l'étaient les premiers sons de synthèse. Si on voulait vraiment composer à l'aide de l'ordinateur, non plus pour en démontrer la possibilité, mais réellement pour *créer*, il allait falloir ménager suffisamment de place au compositeur dans le processus pour qu'il puisse insuffler au résultat final les qualités qui distinguent une œuvre authentique du simple résultat de l'application d'un ensemble de règles d'écriture. C'est ainsi qu'on est passé de la *composition automatique*, dans laquelle le rôle du compositeur se limitait à la préparation des données initiales de l'algorithme, à la *composition assistée par ordinateur* (CAO) pour laquelle ce rôle s'élargit considérablement.

On ne peut pas, cependant, tracer de frontière concrète entre ces deux champs. Dans « Composition Automatique », il y a l'idée que le résultat final est produit sans aucune intervention humaine. Cela ne serait rigoureusement exact que si le programme utilisé était lui-même engendré par un processus similaire, ce qui n'est évidemment pas le cas. Par conséquent, aucune composition n'est totalement automatique parce que le code qui l'a produit, même s'il se contente d'écrire des notes aléatoires sur une partition, est forcément la transcription de l'*intention* de son auteur. A l'inverse, l'expression « Composition Assistée par Ordinateur » implique l'idée d'une coopération entre la machine et l'homme, mais on peut toujours considérer l'ensemble des actions de ce dernier comme la simple fourniture de données à un processus par ailleurs totalement automatique. On voit bien qu'aucune distinction absolue ne peut être établie entre CA et CAO et qu'il s'agit plutôt d'une question d'appréciation du degré de liberté accordé à l'utilisateur, voire tout simplement d'une décision, d'une attitude.

4.2. Vers la programmation musicale

Les premiers programmes de composition automatique étaient relativement simples dans leur principe : ils se contentaient d'exploiter le hasard par « filtrage » au moyen de règles de composition. Les programmes de CAO commencent dès la fin des années 60 à devenir plus complexes, et en particulier à emprunter les outils de l'intelligence artificielle [Roads1980b]. Au cours des années 70 et 80, les approches les plus diverses se multiplient (cf. [Loy1989] pour une revue complète de ces différents systèmes). A cette époque, les environnements de composition sont souvent l'œuvre d'une seule personne ou d'une petite équipe – les laboratoires de recherche en informatique musicale sont encore de taille réduite – et ont donc tendance à refléter des visions très personnelles de la CAO. Chacun développe son propre système, celui qui correspond le mieux à ses préoccupations musicales,

à ses besoins. Ce faisant, il court le risque que son travail ne soit finalement utilisé que par lui et par son entourage immédiat et c'est souvent ce qui se passe effectivement. Il n'y a rien d'étonnant à cela : libérée de toute contrainte formelle, la composition emprunte alors des chemins propres à chaque compositeur, qui sont rarement suivis par d'autres que ceux qui les ont tracés.

Puisque chaque compositeur est amené à concevoir ses propres processus de composition, il est éminemment souhaitable de lui éviter d'avoir à reprogrammer un système complet, à l'aide d'un langage informatique non spécialisé, à chaque fois qu'il souhaite explorer une nouvelle piste. C'est suite à ce constat que plusieurs équipes de recherche se sont orientées vers le développement d'environnements ouverts et d'authentiques *langages de programmation musicale*, comme les trois « descendants » de Music V déjà cités, mais aussi Common Music [Taube 1991], Lisp Kernel [Rahn 1990] ou encore les nombreux langages développés par Roger Dannenberg et ses collaborateurs, dont Nyquist [Dannenberg 1997].[17] Parce qu'ils fournissent une base commune de fonctions essentielles, ces environnements permettent non seulement de développer plus rapidement des algorithmes de composition mais aussi de les échanger plus facilement avec d'autres personnes. Leur succès actuel confirme l'intérêt de ces possibilités : les environnements fermés, qui imposent un processus de composition, ont quasiment disparu depuis longtemps, et sont restreints à des projets de recherche très spécifiques.

La programmation musicale propose de manipuler les structures musicales en tant que variables, représentées de différentes manières (listes ou flux d'évènements, structures de données hiérarchiques, objets, etc.), sur lesquelles on effectue diverses opérations. Dans ce cadre, le travail du compositeur consiste en la mise au point de différents algorithmes qui créent ou traitent des structures musicales, comme autant de processus compositionnels, plus ou moins complexes, communiquant entre eux. Cette interprétation, qui se rapproche du principe de modularité et présente certains de ses avantages, est favorisée lorsque le langage utilisé est orienté objets, l'utilisateur étant alors directement incité à organiser le schéma de composition global en sous-parties plus simples. On constate effectivement que les langages à objets ont souvent été employés, en particulier SmallTalk et Lisp (avec le Common Lisp Object System) [Pope 1991].

Abordée sous l'angle du codage, la programmation musicale nécessite de bonnes connaissances en informatique, ce qui limite sa portée à une certaine catégorie de compositeurs ayant reçu la formation nécessaire. Pour épargner à l'utilisateur l'apprentissage d'un langage informatique, on peut alors avoir recourt à la programmation visuelle. Ce paradigme, qui dispose d'une puissance d'expression plus faible que celui de la programmation classique (à moins qu'un accès au code informatique sous-jacent soit préservé, comme c'est le cas avec OpenMusic), présente en effet les concepts de façon beaucoup plus intuitive. Initié principalement avec Max (un environnement destiné à la création de systèmes musicaux interactifs), il a été utilisé avec succès pour la composition structurelle, notamment dans l'environnement PatchWork et son successeur OpenMusic, tous deux mis au point à l'IRCAM [Assayag&al. 1997] et basés sur Lisp.

4.3. S'inspirer de la Nature

Xenakis est le premier compositeur à s'intéresser à l'utilisation de calculs combinatoires et probabilistes dans la composition musicale. Il jette les bases du mouvement stochastique dès la fin des années 50 et compose les premières œuvres basées sur ses principes sans l'aide de l'ordinateur. Celui-ci

[17] On remarquera qu'une grande partie de ces langages reposent sur Lisp ou l'un de ses dialectes, ce qui montre la filiation à la fois théorique et pratique de la CAO avec l'intelligence artificielle, domaine d'origine de ce langage.

n'est mis en œuvre qu'en 1962 avec le programme ST, utilisé pour la composition de toute une série de pièces pour orchestre tirant leur nom de celui du programme. L'ordinateur est ici uniquement utilisé pour écrire des partitions, qui sont ensuite jouées par des instruments traditionnels. La musique stochastique n'est pas issue de l'informatique mais elle en a fait dès que possible un grand usage pour automatiser les calculs de probabilités. Au cours des années 60, alors que Xenakis commence à explorer d'autres voies, la musique stochastique s'est solidement implantée, notamment en informatique musicale. En effet, elle est l'une des réponses les plus évidentes à la disparition des règles de composition traditionnelles : une façon de « remplir l'espace musical » est en effet de faire appel au hasard, mais un hasard contrôlé par le compositeur et devenant par ce moyen porteur d'intentions. Ainsi, à la fin des années 70, la mise au point de techniques stochastiques est toujours un axe de recherche actif [Myhill 1979 ; Lorrain 1980]. Afin d'obtenir un contrôle plus profond, plus « structurant », les méthodes mises en œuvre font appel à des techniques et des concepts plus évolués que les simples tirages aléatoires, comme les chaîne de Markov [Jones 1981] ou le fameux « bruit en 1/f », un type de bruit corrélé dont le spectre de puissance se retrouve dans de nombreux phénomènes naturels ainsi que dans les résultats de l'analyse de certaines pièces musicales [Bolognesi 1983].

L'utilisation de distributions statistiques déjà identifiées dans la Nature ou dans des œuvres musicales traditionnelles nous rappelle ce que nous avons déjà vu au niveau de la composition sonore : il s'agit, là aussi, de retrouver dans le « passé musical » des propriétés subtiles, souterraines, mais néanmoins fondamentales, dont nous ne pouvions avoir conscience qu'à condition de sortir du système qui les portait. Cette excursion, déjà amorcée avec des courants musicaux aussi formels que le sérialisme intégral et la musique stochastique, se prolonge largement avec la composition algorithmique qui, par une automatisation à large échelle, accroît l'influence du formalisme sur le résultat final. Une pièce composée entièrement à l'aide d'un processus stochastique, par exemple, est majoritairement issue d'une logique compositionnelle abstraite et répond peu aux nécessités perceptives qui ont sans doute contribué à façonner les règles traditionnelles, comme le suggère – entre autres – la découverte de similarités statistiques entre certains phénomènes naturels et le spectre de pièces musicales traditionnelles. En employant des lois de probabilité « naturelles », on cherche à domestiquer le hasard, à le doter d'une structure proche de celles que nous sommes habitués à entendre, que ce soit dans la Nature ou dans des œuvres classiques. Mais de même que la modélisation physique n'a pas pour propos de revenir aux sons instrumentaux connus, il n'est pas non plus question ici de prôner un retour à la théorie musicale d'avant le XXe siècle, mais de découvrir certaines qualités structurelles, rythmiques ou mélodiques, qui pourraient « animer » les compositions contemporaines.

C'est donc au cours des années 80 que les limites inhérentes aux méthodes stochastiques, quant à la qualité des phénomènes qu'elles génèrent et au contrôle qu'elles autorisent, poussent les chercheurs à s'intéresser à d'autres techniques qui permettraient de travailler avec un matériau musical toujours imprévisible, mais doté d'une structure interne plus forte que les simples propriétés statistiques. Ces techniques viendront d'un domaine alors en plein essor : la théorie du chaos et des systèmes non linéaires. Ces derniers sont en effet le siège de comportements qu'on pourrait croire aléatoires, mais qui, à y regarder de plus près, sont en fait sous-tendus par une organisation très complexe, hiérarchisée, fractale, qui reflète leur déterminisme. En établissant un lien entre la structure de ces phénomènes et la nature également hiérarchique des œuvres musicales, quelle que soit la période considérée, il est alors tentant d'essayer de générer de la musique à l'aide de systèmes non linéaires. Ceux-ci ont effectivement beaucoup été utilisés pour la CAO depuis la fin des années 80 : bruit autosimilaire en 1/f [Dodge 1988], « cartes non linéaires » (ou *non linear maps*) [Pressing 1988], ou encore attracteurs de Hénon et de Lorentz [Bidlack 1992]. A l'instar des techniques stochastiques, ces différentes approches permettent de générer un matériau musical très complexe, mais elles restent par

nature difficiles à contrôler et les liens entre les propriétés de ce matériau et la perception que nous pouvons en avoir n'ont pas encore été étudiés suffisamment en profondeur pour établir avec certitude leur pertinence musicale – ce qui n'empêche pas, bien évidemment, que des œuvres soient effectivement créées à l'aide de ces outils.

Deux autres catégories de méthodes issues des sciences de la nature ont été importées dans le domaine de la CAO, parfois en étant combinées : les réseaux de neurones [Dolson 1989] et les techniques génétiques [Burton&Vladimirova 1999]. Dans les deux cas, l'objectif est de faire réaliser par un système des opérations de haut niveau, sans avoir à lui préciser *comment* obtenir les solutions voulues. Il est clair que les résultats ne peuvent être satisfaisants du premier coup. Le système doit donc s'organiser de façon relativement autonome pour arriver à faire ce qu'on attend de lui. Pour les techniques neuronales, cela passe par la phase d'*apprentissage* ; pour les techniques génétiques, c'est le principe d'*évolution* par croisement, mutation et sélection des individus qui assure qu'on s'approche d'une solution (optimale ou non).

Les réseaux de neurones, comme on peut s'y attendre, sont particulièrement utilisés pour modéliser des tâches relevant de processus perceptifs et cognitifs, comme l'identification de hauteurs [Sano&Jenkins 1989] ou la classification automatique d'œuvres musicales [Feiten&Gunzel 1994]. En ce qui concerne la composition, l'une des principales applications consiste à faire apprendre à un réseau un certain nombre de mélodies ou de rythmes, puis à lui demander de générer des variantes à partir de ces « connaissances » – on réalise ainsi une sorte d'interpolation entre les structures musicales apprises [Dolson 1989 ; Todd 1989]. Les techniques génétiques offrent, de façon similaire, la possibilité d'explorer un espace musical relativement bien délimité, mais spécifié cette fois-ci par les critères de sélection des individus ; ces derniers peuvent soit représenter chacun une séquence musicale (algorithmes génétiques), soit être eux-mêmes des programmes capables de générer des séquences (programmation génétique). D'une certaine façon, les techniques génétiques permettent de trouver des solutions à des problèmes de résolution de contraintes formulées indirectement par la fonction d'évaluation des individus[18] – une approche totalement différente de la composition avec la *programmation par contraintes* pratiquée, entre autres, à l'IRCAM (cf. par exemple [Truchet&al. 2001]).

La possibilité de réaliser avec l'ordinateur des opérations aussi complexes, en ignorant *a priori* les solutions qui vont être adoptées par le système, peut paraitre relativement « magique » : l'auto-organisation du processus de traitement semble absorber d'une certaine manière la difficulté du problème. Cette impression est encore renforcée par le fait que ces techniques ne nécessitent pas que le problème soit codé dans le processus lui-même. Ainsi les neurones d'un réseau artificiel ignorent la signification de leurs entrées et sorties ; ils sont aveugles au contexte du traitement qu'ils effectuent. Si les sorties d'un réseau de neurones ou le « code génétique » d'un individu artificiel ont une sémantique, c'est que ces données sont un codage du problème considéré. En réalité, la difficulté de celui-ci n'a pas disparu, elle s'est déplacée dans la mise au point de ce codage, mais aussi dans le contrôle du processus d'auto-organisation, c'est-à-dire soit dans la conception de l'algorithme d'apprentissage pour un réseau de neurones, soit dans la définition de la fonction d'évaluation des individus. Si cette étape n'est pas effectuée correctement, par exemple si la fonction d'évaluation est mal choisie, le système ne produira pas (ou pas exactement) le comportement qu'on attendait de lui. Il n'y a donc rien de magique ici : un problème difficile à résoudre classiquement, en cherchant une

[18] Cette fonction juge l'adaptation de l'individu à « l'environnement » du problème ; elle détermine ses chances de se reproduire et de perpétuer son code génétique.

solution déterministe, a de grandes chances de poser des difficultés au cours de sa « traduction » en problème d'apprentissage neuronal ou d'évolution artificielle. Il existe certainement, en informatique musicale comme ailleurs, des catégories de problèmes mieux adaptés que d'autres à l'utilisation des techniques de la vie artificielle. Il est évident que celles-ci sont encore loin de pouvoir être appliquées partout, d'autant plus qu'il s'agit de domaines d'études très récents dans lesquels d'importants développements sont encore attendus.

4.4. La hiérarchisation

Des méthodes stochastiques à la programmation génétique, en passant par les méthodes algébriques [Andreatta 2003], les modèles géométriques [Kendall 1981] ou les grammaires formelles [Roads 1979], la composition structurelle avec l'ordinateur a emprunté presque autant de voies différentes qu'il y a eu de compositeurs et de chercheurs pour s'y intéresser. Malgré cette diversité, on peut retrouver dans chacune des ces approches la présence plus ou moins prononcée de la notion de hiérarchie. Il est question, avec ces méthodes, d'organiser dans le temps des évènements musicaux ; pour ce faire, les compositeurs adoptent le plus souvent une structure à plusieurs niveaux, les pièces étant divisées en un certain nombre de sections, elles-mêmes constituées de plusieurs parties et ainsi de suite jusqu'au niveau de la note : on a bien une hiérarchisation des évènements.

Pourquoi cette organisation est-elle si souvent employée ? On pourrait s'étendre longuement sur le sujet et notamment s'interroger sur une éventuelle correspondance avec la structure de nos processus cognitifs, qui semblent, à l'évidence, enclins à identifier dans le monde des objets et à les ranger en catégories, puis en « super-catégories », etc. Nous nous contenterons ici d'un point de vue plus pragmatique, en considérant que la hiérarchisation répond à un double objectif, à la fois compositionnel (niveau poiétique) et perceptif (niveau esthésique). En ce qui concerne le premier point, le découpage d'une pièce en différentes parties et sous-parties permet de minimiser en permanence l'effort cognitif nécessaire à la représentation mentale de l'ensemble du matériau musical, par « factorisation » de l'information ; lorsque le compositeur travaille sur une section particulière, quel qu'en soit le niveau, il a seulement besoin d'avoir présentes à l'esprit les données directement relatives à celle-ci et éventuellement à son voisinage immédiat. La hiérarchisation introduit des niveaux d'abstraction qui permettent de se représenter des quantités d'informations arbitraires (par exemple des pages entières de partition) à l'aide d'un nombre restreint d'unités mnésiques : elle répond ainsi au fameux principe d'économie au niveau cognitif. Au niveau esthésique, maintenant, l'organisation hiérarchique permet tout simplement d'articuler le discours musical, de le rendre plus apparent et cohérent que s'il était porté par une structure linéaire, continue, du début à la fin de la pièce. La structure d'une pièce, le contraste entre les parties successives au niveau du rythme, de la couleur, de la durée, sont des moyens dont le compositeur dispose pour véhiculer ses intentions, pour s'exprimer.

La hiérarchisation est clairement une notion fondamentale pour la composition structurelle et il semble qu'un environnement de CAO ne disposant pas d'outils permettant de gérer cet aspect de la création serait certainement perçu comme incomplet. C'est ce qu'on observe dans les faits : bien qu'aucun paradigme de composition ne se soit imposé en informatique musicale depuis les débuts, tous intègrent, d'une façon ou d'une autre, la possibilité de structurer le matériau musical en différents niveaux.

La hiérarchie des évènements est souvent représentée par un arbre informatique – un choix pour le moins évident – comme dans les travaux de Diener [Diener 1989] ou de Buxton [Buxton&al. 1978]. De nombreuses expériences ont naturellement employé les grammaires formelles pour la génération de

ces arbres, particulièrement à une époque (les années 70 et 80) où ce domaine, alors relativement nouveau, suscitait un grand d'intérêt dans de nombreux domaines. Les travaux de Chomsky sur le langage ont inspirées de nombreuses réflexions visant en particulier à déterminer, au niveau cognitif, si la musique est perçue et/ou composée à l'aide d'une certaine grammaire (cf. en particulier [Lerdahl&Jackendoff 1983] pour le cas de la musique tonale). Dans une perspective de création, on peut dire avec Roads [Roads 1979] que la vraie question réside plutôt dans la découverte de grammaires particulièrement intéressantes pour la composition. Depuis, l'intérêt pour ce domaine semble être retombé, sans doute parce que l'expérience à montré qu'il n'apportait pas l'approche « universelle » qu'on semblait attendre de lui.

D'autres approches n'envisagent pas la hiérarchisation sous une forme explicite, mais cherchent à la faire apparaître par émergence, comme dans les environnements basés sur des systèmes chaotiques. Le contrôle de la structure produite par un tel système n'est que partiel, ce qui constitue un problème fondamental ; en contrepartie, les structures produites présentent des propriétés riches et complexes qu'il serait très difficile ou fastidieux d'atteindre « à la main », comme l'autosimilarité.

En position intermédiaire entre la démarche où la hiérarchie est placée au centre du processus de composition et celle où elle émerge d'un processus complexe et plus global, on peut situer le paradigme de la programmation par objets. Celui-ci encourage en effet le compositeur à créer des classes de composants correspondant chacune à un niveau hiérarchique différent et ainsi à faire coïncider précisément la structure du programme et celle de sa production. Cette façon de travailler, dont l'environnement FORMES a été l'un des principaux représentants, répond au principe d'économie, en facilitant le passage du processus de production à son résultat et vice-versa.

En conclusion, on peut dire qu'il n'existe à pas d'approche privilégiée pour organiser les évènements dans une pièce musicale ; c'est au compositeur que revient, comme souvent dans la composition structurelle, le choix des outils les mieux adaptés à ses besoins, ses objectifs et ses compétences.

4.5. Entre la structure et le son

4.5.1. Dépasser le paradigme partition/instrument

Toute œuvre musicale composée, au niveau abstrait, à l'aide de l'ordinateur aurait pu l'être à la main, à la différence près, toutefois, que la machine est immensément plus rapide que l'homme dans les tâches calculatoires. Il s'agit ici d'un changement d'échelle temporelle d'une telle ampleur qu'on peut parler d'un véritable bouleversement dans les pratiques compositionnelles. La puissance de l'ordinateur est telle qu'elle permet de composer selon des règles qui auraient nécessité, sans son aide, des années ou des siècles de calcul. Les outils de CAO se révèlent d'une extraordinaire efficacité lorsqu'il s'agit de tester rapidement de nombreuses idées musicales, basées sur des principes de composition éventuellement très complexes. Toutefois, la composition abstraite à l'aide de l'ordinateur ne constitue pas un nouveau principe de composition en elle-même.

Une nouveauté plus fondamentale introduite par l'informatique dans la création musicale réside plutôt dans la rupture possible du paradigme partition/instrument et donc le développement de techniques de composition structurelle – telle que nous l'avons définie précédemment – permettant une articulation riche et nouvelle entre le sonore et le structurel. Nous disposons, grâce à la synthèse et au traitement, d'une palette de sons immense et infiniment plus malléable que celle des instruments acoustiques ; une approche radicalement nouvelle de la composition est donc d'explorer comment la structure et le matériau sonore peuvent interagir en allant au-delà de ce qu'on connaissait déjà, c'est-à-dire les nuances du jeu instrumental. Comme nous l'avons déjà remarqué, l'expressivité portée

traditionnellement par le rapport avec l'instrument doit être conservée dans la musique par ordinateur – la réhabilitation du canal gestuel étant dans cet objectif une voie privilégiée ; en profitant du contrôle bien plus profond dont nous disposons maintenant sur le matériau sonore, nous pouvons étendre le champ d'action de l'expression musicale à des paramètres jusqu'à présent peu accessibles, en particulier le timbre. Plusieurs compositeurs, parmi lesquels Risset et Chowning ont incontestablement été des pionniers, ont démontré l'importance de cette démarche : leurs pièces mixtes ou pour bande se caractérisent par une forte cohésion entre la structure formelle et le matériau sonore employé et par une maîtrise des outils de synthèse d'autant plus impressionnante qu'elle est obtenue uniquement par programmation, sans le recours aux interfaces gestuelles aujourd'hui disponibles. La pièce *Sud*, composée par Risset, avait ainsi eu à l'ICMC 1986 un retentissement particulièrement important, justement parce qu'elle témoignait d'une véritable attention portée à l'articulation entre la structure et le son [Kendall&al. 1986]. Cette approche tranchait alors avec la majorité de la production musicale électronique de l'époque, globalement « enfermée » dans le paradigme partition/instrument – même si « l'instrument » en question était un processus novateur de synthèse ou de traitement du son.

4.5.2. La « révolution » MIDI

Cependant, les choses ne s'arrangent guère au cours des années 80, en grande partie à cause de l'apparition de la norme MIDI. Ce protocole visant à standardiser la communication entre appareils de musique électronique n'allait pas favoriser la créativité des chercheurs en matières d'articulation structure/son. Il est indéniable que la définition d'un tel standard répond à une vraie nécessité, celle de faire communiquer facilement des systèmes très différents afin de créer des configurations complexes, pour le studio comme pour la scène. Mais MIDI a été conçu par et pour l'industrie de la musique électronique, alors en pleine expansion, ce qui implique l'adoption d'un certain nombre de compromis visant à assurer le succès commercial. Le choix le plus critiquable a été de baser le protocole sur la notion d'évènement plutôt que sur celle – plus générale – de variation continue de valeurs, ce qui, en plus de le rendre inadapté aux contrôleurs continus (par exemple les contrôleurs à souffle) et donc à une interaction gestuelle n'utilisant pas le clavier [Moore 1988], oriente fortement son utilisation vers un schéma de type séquenceur/synthétiseur, soit une nouvelle version – appauvrie, de surcroît – du paradigme partition-instrument. Bien que permettant théoriquement, grâce aux différents canaux dédiés aux contrôleurs, d'intervenir en profondeur sur le son, MIDI incite en fait à se contenter d'un travail « en surface » [Vaggione 1996].

Le succès durable du MIDI montre qu'il répond à un besoin réel dans la communauté de la musique électronique ; il est cependant regrettable que des bases aussi étriquées (tant du point de vue du principe même que des spécifications techniques, notamment en matière de bande passante) aient été choisies et soient toujours en vigueur.[19] En outre, MIDI a suscité tellement d'intérêt que ses applications, en particulier les séquenceurs, ont absorbé une grande partie des efforts de recherche au cours des années 80 (comme en témoigne le nombre de publications sur le sujet à cette période), masquant ainsi le défi plus fondamental, mais plus difficile de l'articulation structure/son. La littérature scientifique a déjà beaucoup commenté les conséquences du phénomène MIDI. Nous nous contenterons donc de conclure notre réflexion à ce propos en remarquant qu'à l'heure où une grande partie de la communauté a pris conscience de la nécessité de rétablir le canal gestuel comme moyen d'interaction privilégié avec les processus de synthèse voire de traitement, les limites du MIDI

[19] D'autres protocoles ont depuis été proposés ; après l'échec de ZIPI [McMillen 1994], Open Sound Control [Wright&al. 2003] est une solution beaucoup plus prometteuse, de part son aspect très ouvert.

apparaissent comme réellement rédhibitoires et d'autres solutions sont de plus en plus fréquemment mises en œuvre au niveau des protocoles et de leur support physique.

4.5.3. Exemples d'environnements complets de création musicale

La norme MIDI n'a heureusement pas détourné les chercheurs des travaux portant sur la composition à des niveaux intermédiaires entre le son et la structure abstraite. De nombreuses façons d'envisager ce problème ont d'ailleurs été proposées dès la fin des années 70. Ces *environnements complets de création musicale* – c'est ainsi que nous dénommerons les systèmes permettant d'envisager une large partie du « spectre » de la composition, de la structure abstraite au son – peuvent être divisés en trois catégories :

- ceux composés d'une collection de logiciels indépendants assurant chacun une fonction simple (par exemple composition algorithmique, édition de partitions, synthèse du son, analyse, traitement, etc.) comme CARL [Loy 2002], le projet CERL [Scaletti 1985], ou le système proposé par Decker et ses collègues [Decker&al. 1986] ;
- ceux consistant en un seul logiciel au sein duquel plusieurs langages coexistent et couvrent chacun un aspect de la composition. L'exemple le plus remarquable est DMIX [Oppenheim 1996], dont l'un des principes de conception centraux était précisément d'offrir de nombreuses représentations différentes des mêmes données (*piano-roll*, liste de notes, code SmallTalk, etc.), afin que l'utilisateur puisse, à tout moment, employer celle qui lui semble la plus adaptée à la tâche qu'il est en train de réaliser ;
- ceux consistant en un seul logiciel permettant d'envisager toutes les facettes de la composition à l'aide d'*un seul* langage : nous avons déjà cité FORMES, GENESIS, Max/MSP, OpenMusic, auxquels il faut ajouter Pure Data, PWGL et les successeurs de Music N, dont CSound.

On voit que dans tous les cas la modularité peut être pratiquée, mais à chaque fois d'une façon bien particulière. Dans les environnements des deux premiers types, les modules peuvent être de nature extrêmement différente et assurer individuellement des fonctions déjà complexes, ce qui rend plus difficile leur apprentissage et introduit des ruptures lors du passage d'un niveau compositionnel à un autre. Le paradigme, proposé par DMIX, d'une interface multimodale flexible et extensible que l'utilisateur peut adapter à ses besoins semble intéressant au premier abord, mais il fait encourir à celui-ci le risque de se perdre dans la diversité des représentations musicales disponibles et d'éparpiller ses efforts dans des tâches non musicales.

Dans les environnements du troisième type, l'unicité du langage sous-jacent assure la fluidité du passage entre les différents niveaux de composition. D'ailleurs, si les environnements des deux premiers types étaient les plus courants pendant les années 80, ceux du troisième type sont majoritaires actuellement, ce qui est d'autant plus remarquable qu'ils sont tous redevables d'une certaine façon aux premiers travaux de Max Mathews – ce qui démontre, si besoin était leur caractère absolument fondamental. L'intégration cohérente de tous les aspects de la création selon une approche modulaire sera sans doute à l'avenir un facteur majeur de succès pour des environnements musicaux sortis de l'adolescence de l'informatique musicale.

4.6. La composition avec le modèle physique : un nouveau paradigme

La modélisation physique avait en premier lieu été envisagée comme une technique de synthèse sonore : selon une certaine vision « standard », elle serait destinée principalement à la construction d'instruments virtuels dont on pourrait jouer en temps réel à l'aide d'interfaces gestuelles plus ou moins sophistiquées (des classiques claviers MIDI aux périphériques à retour d'effort en passant par

les contrôleurs à souffle) ou en temps différé, à l'aide de gestes instrumentaux virtuels simulées algorithmiquement.

Cette vision ne tient pas compte d'une autre possibilité tout aussi fondamentale. Puisque les objets simulés sont inscrits dans le temps, il est possible de tirer parti de leurs comportements pour générer des structures temporelles. Il suffit pour cela de créer des objets dont les mouvements ne sont pas situés dans la bande de fréquence des sons audibles (*échelle* ***acoustique****) mais dans celle immédiatement inférieure (*échelle* ***macro-temporelle****).*[20] Ces objets ne peuvent pas produire de son par elles-mêmes ; ils ne sont utiles qu'associés à des structures acoustiques, avec lesquelles ils vont interagir de façon uni- ou bidirectionnelle (cf. ci-dessous).

Prenons l'exemple d'un modèle physique (très facilement réalisable avec CORDIS-ANIMA) composé d'une masse ponctuelle reliée a un point fixe par un ressort linéaire : il s'agit d'un simple oscillateur harmonique, dont on supposera qu'il n'est pas amorti. Une fois excitée et laissée libre, la masse a un mouvement d'oscillation sinusoïdale dont la fréquence, selon la raideur du ressort, peut se situer ou non dans le domaine audible. Si elle est égale à 0.1 Hz, le système peut être utilisé pour générer une structure rythmique extrêmement simple correspondant à un évènement musical toutes les 10 secondes (par exemple lorsque la masse atteint sa position maximale). En revanche, si la fréquence propre de l'oscillateur est de 440 Hz, ce système produira indéfiniment le diapason du téléphone. On voit qu'avec le même « langage », qui plus est avec un seul objet paramétré de deux manières différentes, la modélisation physique permet d'aborder soit le terrain de la synthèse sonore, soit celui de la composition structurelle. Fort heureusement, on dispose pour l'une et l'autre, d'objets bien plus complexes que l'oscillateur harmonique. Il s'agit donc ici de développer une nouvelle démarche de composition s'appuyant entièrement sur le paradigme de la modélisation physique.

Pour l'instant, les seuls travaux allant dans ce sens ont été menés avec CORDIS-ANIMA, plus particulièrement dans GENESIS : si de nombreuses pièces musicales font appel aux différentes techniques de modélisation physique, elles le font uniquement pour la synthèse sonore et non pour la création de la structure musicale [Chafe 2004]. Il semble que les techniques autres que CORDIS-ANIMA s'y prêtent moins, parce qu'elles abordent la modélisation à un niveau plus abstrait ; les principes de *l'interaction physique entre objets matériels* et de la *modularité* n'étant généralement pas pris en compte, la combinaison de différents objets situés à des échelles fréquentielles différentes est plus difficile ou, dans tous les cas, beaucoup moins directe. Dans le système CORDIS-ANIMA, tous les objets simulés, du plus simple au plus complexe, sont sensibles (*via* une transduction) et sont inscrits dans le temps et l'espace, comme le sont les objets du monde réel. Ils peuvent interagir entre eux et ainsi aisément être organisés pour former des dispositifs complexes. A l'inverse, les composants fondamentaux des autres méthodes de modélisation physique (par exemple, les lignes de délai et les filtres, pour la méthode des guides d'onde) n'ont pas une « physicalité » suffisamment directe pour permettre une telle approche.

L'idée de composer au moins une partie de la structure d'une pièce grâce à la modélisation physique est déjà présente dans la réalisation du film musical « *Esquisses* », création de l'ACROE entièrement basée sur CORDIS-ANIMA [Cadoz&al. 1994], mais elle ne devient véritablement explicite qu'avec la présentation en 2002 de la pièce *pico..TERA* de Claude Cadoz, entièrement générée par un seul modèle

[20] On peut également décomposer l'échelle macro-temporelle en plusieurs domaines. L'échelle *gestuelle* correspond à celui dont les constantes de temps sont similaires à celles du geste, à la limite du micro-temporel. Au-delà, on trouve les domaines correspondant aux phrases musicales, puis aux structures plus longues, jusqu'à l'échelle de l'œuvres entière (soit jusqu'à des durées pouvant dépasser plusieurs minutes).

GENESIS, sans aucun traitement [Cadoz 2002b]. Certains des aspects les plus intéressants de la composition à l'aide du modèle physique particulaire apparaissent clairement dans cet article. En premier lieu, la nomenclature utilisée pour désigner les objets composants le modèle, fortement basée sur un vocabulaire musical (« Maracas », « Instrumentiste », « Chef », « Batteur », « Plectre », …) mais aussi sur d'autres termes plus visuels (« Dominos », « Serpents », « Anneaux », …), souligne le rôle fondamental que la *métaphore* peut tenir dans la conception de telles structures. Etant donné la nature physique des modules CORDIS-ANIMA, l'utilisateur de GENESIS peut en effet s'appuyer sur des références au monde réel pour s'aider à construire et à se représenter les modèles, que ce soit en fonction de leur topologie , de leur comportement ou encore de leur fonction. Cette possibilité, propre à la modélisation physique et tout spécialement à l'approche masses-interactions, est bien évidemment un facteur permettant d'augmenter l'intuitivité de la méthode de synthèse, que ce soit pour comprendre un modèle préexistant ou pour en créer un nouveau. On doit cependant insister sur le fait que, la plupart du temps, il s'agit seulement de métaphores et non de *reproductions* de la réalité, une confusion qu'il est sans doute important de désamorcer pour éviter de perdre de vue que le monde réel et le monde simulé *ne sont pas identiques* et ne peuvent donc pas contenir les mêmes objets. Un recours trop systématique à la métaphore aurait par ailleurs tendance à masquer les potentialités « exotiques » du monde virtuel, qui méritent d'être examinées avec autant d'attention, sinon plus, que les possibilités d'imitation du réel.

Un autre développement intéressant de la composition par modèle physique CORDIS-ANIMA réside dans le travail sur la hiérarchisation des modèles. Dans une hiérarchie absolue, les informations ne circulent que dans un sens, du niveau le plus élevé vers les niveaux inférieurs. Cette situation peut être obtenue avec CORDIS-ANIMA, grâce à la technique consistant à accorder aux composants du système des inerties croissant exponentiellement avec leur niveau. Ainsi le « Chef » contrôle « l'Instrumentiste » qui contrôle à son tour « l'Instrument », la communication restant unidirectionnelle. Mais on peut également réaliser, comme le décrit Cadoz, des hiérarchies plus faibles, dans lesquelles un objet situé à un niveau donné est influencé par des objets de niveau inférieur ; on arrive ainsi à des comportements complexes et relativement imprévisibles, dus à la différence d'échelle fréquentielle des composants, et qui affichent parfois, de façon surprenante, une certaine expressivité apparente. Ces phénomènes sont d'une richesse passionnante, mais ils restent difficiles à contrôler ; cela n'a plus rien d'étonnant lorsqu'on se rend compte qu'on est sans doute ici en train de manipuler des systèmes chaotiques – qu'il serait d'ailleurs intéressant d'étudier avec les outils appropriés.

Nous suivons alors un chemin que nous connaissons déjà, celui qui nous ramène vers une certaine complexité propre aux phénomènes naturels. Basé sur les principes de la physique, le système CORDIS-ANIMA un moyen privilégié pour accéder à ces fameuses propriétés difficilement qualifiables qui font qu'un phénomène naturel (et nous incluons maintenant dans ce terme ce que l'homme, en tant que corps agissant, est capable de produire) attire notre attention et nous touche durablement, tandis qu'un phénomène trop « synthétique », après nous avoir peut-être interpellé par une certaine étrangeté due à son caractère artificiel, fini par nous ennuyer dès que notre système perceptif en a compris la logique. Ainsi la création avec la modélisation physique ne permet pas seulement de bâtir, pierre par pierre, l'édifice musical en déterminant de façon parfaitement déterministe une organisation temporelle comprenant la position de chaque évènement musical et le son qui va le réaliser. Si le compositeur le souhaite, il peut, comme avec la composition algorithmique, concevoir de véritables processus compositionnels sous forme de composants présentant des comportements complexes, plus ou moins imprévisibles, plus ou moins influençables par les autres objets qui l'entourent. On peut ainsi imaginer de construire des modèles dans lesquels, de proche en proche, tous les niveaux communiquent pour aboutir à l'émergence d'une œuvre musicale en partie

déterminée par le compositeur et en partie produite par l'interaction complexe, parfois même chaotique, des différents composants.

La modélisation physique CORDIS-ANIMA couvre les aspects de la composition allant de celle de la structure à celle du son, en permettant une articulation totalement continue entre les différents niveaux intermédiaires, mais elle rend également accessible une large palette de méthodes de composition, de la plus déterministe à la plus chaotique. Nous sommes en présence d'un nouveau paradigme de création doté d'une grande généralité, qui étend le champ de la « pensée physique », autrefois restreint à la synthèse du son : ses possibilités ne demandent plus qu'à être explorées.

5. Deux enseignements

A l'issue du rapide examen des problématiques de la composition sonore et structurelle à l'aide de l'ordinateur que nous venons de réaliser, deux points nous semblent particulièrement importants.

Avant l'apparition des nouvelles technologies, la création musicale était le fruit d'une tradition multimillénaire qui intégrait progressivement les nouvelles propositions, les nouveaux outils, selon un processus qu'on peut comparer à celui de l'évolution naturelle. Les bouleversements technologiques amorcés avec la maîtrise de l'électricité, qui ont trouvé leur point d'orgue avec l'informatique, ont coïncidé avec la révolution esthétique musicale que nous avons évoquée au début de cette introduction[21] : la conjugaison de ces deux facteurs a conduit à une exploration « effrénée » des nouveaux territoires ainsi découverts. Dans le même temps, nous avons momentanément oublié que la pratique musicale passée, dont on s'éloignait ainsi à grands pas, était dans tous ses aspects (composition, jeu instrumental, sons) adaptée à des contraintes naturelles, celles des capacités humaine d'action, de perception et de cognition, issues d'une longue adaptation aux lois et aux propriétés du monde physique. Une grande partie des recherches actuelles reflète le fait que la communauté de l'informatique musicale a pris conscience de cette situation et opère une réflexion visant à concilier à nouveau les moyens technologiques disponibles et les lois indépassables de notre corps. Il est aujourd'hui évident à tous les niveaux que la création musicale, aussi libre soit-elle d'un point de vue esthétique, ne peut faire totalement abstraction de cette « histoire naturelle », qui conditionne irrémédiablement nos moyens de production et de réception de la musique. Ce constat est à l'origine même du système CORDIS-ANIMA et de ses utilisations dans le domaine la simulation multisensorielle interactive avec retour d'effort.

Le deuxième enseignement, plus pratique, mais qui est cependant capital pour la suite de nos travaux, porte sur les environnements informatiques de création artistique. Leur histoire montre clairement que, à l'heure où les théories musicales classiques ont perdu leur place centrale, *chaque compositeur veut pouvoir concevoir son propre système de création*, tout en se plaçant dans un cadre pratique déjà stable et bien documenté, lui évitant d'avoir à « réinventer la roue ». C'est la raison d'être des environnements modulaires, qui procurent les outils élémentaires suffisants pour que puissent être développées, à partir du même langage, des applications extrêmement diverses. Il semble que tout environnement imposant une vision rigide du processus de création musicale soit voué à un échec plus ou moins important.

Nous avons fait de ce constat l'une des principales lignes de conduite pour la réalisation de nos travaux. Nous nous sommes constamment efforcés de respecter la liberté de chaque utilisateur de mettre en place le système de création qui lui convient. Cela supposait donc de placer notre propos à

[21] Cette simultanéité n'est certainement pas le fruit du hasard, mais la commenter sort de notre propos.

un niveau intermédiaire entre celui des modules élémentaires et des niveaux plus élevés faisant intervenir des concepts sonores et musicaux élaborés. C'est la raison pour laquelle notre analyse de création musicale avec CORDIS-ANIMA s'est principalement élaborée autour de ce que nous avons appelé le *niveau neutre* (cf. Chapitre 3).

Partie A Un Instrumentarium pour la création musicale avec CORDIS-ANIMA

Cette première partie a deux objectifs principaux.

Elle vise tout d'abord à exposer le contexte précis de nos travaux et la problématique qui les a motivés. Nous introduirons successivement le système CORDIS-ANIMA et l'environnement logiciel dédié à son application musicale, GENESIS. Nous examinerons les différents axes de recherche relatifs à la création musicale avec CORDIS-ANIMA et présenterons les principaux résultats des travaux correspondants. Nous nous focaliserons plus particulièrement sur l'axe dans lequel s'intègrent nos propres travaux, à savoir l'approche que nous qualifierons de « systémique » dans la mesure où elle envisage les possibilités de modélisation dans leur globalité afin d'en déduire une organisation formelle visant à faciliter l'apprentissage et l'utilisation de ces outils de création. A partir d'une étude critique des propositions précédentes, nous définirons précisément la notion d'Instrumentarium pour la création musicale avec CORDIS-ANIMA, non seulement en tant que composant essentiel d'un environnement didactique pour GENESIS, mais aussi en tant que schéma général pour le développement de modèles sonores et musicaux, qu'ils soient destinés à la simulation en temps différé (comme c'est actuellement le cas avec GENESIS) ou en temps réel, couplés à des interfaces gestuelles à retour d'effort. L'ensemble de ces aspects sera traité dans le Chapitre 1.

Le deuxième objectif de cette partie est d'identifier les différentes approches adoptées dans d'autres domaines liés à création musicale confrontés à des problématiques similaires à celles de la conception de l'Instrumentarium en faisant intervenir des activités de classification et d'organisation de multiples éléments. Nous dédierons une partie du Chapitre 1 à un examen rapide des organisations adoptées dans les environnements informatiques de création musicale. Le Chapitre 2 sera quant à lui consacré à une présentation synthétique des différentes classifications des instruments de musique, qui sera également l'occasion de discuter la notion d'instrument dans le contexte des nouvelles technologies. Dans les deux cas, nous soulignerons les similitudes et les différences avec notre propre domaine d'investigation afin de déterminer les points susceptibles d'inspirer nos travaux.

Chapitre 1. Contexte et problématique de nos travaux

Ce premier chapitre est consacré à la définition du contexte précis de nos travaux et de leurs objectifs. Les deux premières sections introduisent de façon relativement rapide CORDIS-ANIMA et GENESIS, qui ont déjà fait l'objet de nombreuses publications. La troisième section donne un aperçu général de la création musicale avec GENESIS, qui sera largement approfondi dans la deuxième partie de cette thèse. La quatrième section présente les différents axes de recherche et de développement concernant la création musicale avec ces outils. Enfin, la dernière section définit la problématique à laquelle cette thèse tente de répondre, à travers la description de *l'Instrumentarium musical CORDIS-ANIMA* dont la conception est au cœur de nos travaux.

1. Le système CORDIS-ANIMA

Cette section est consacrée à la présentation du système CORDIS-ANIMA. Nous n'en exposerons que les aspects essentiels à la compréhension de nos travaux et renvoyons le lecteur aux références données ci-dessous pour les informations complémentaires, notamment celles qui concernent la justification conceptuelle du développement de ce système.

1.1. Principes et règles de construction

Comme nous l'avons déjà dit, CORDIS-ANIMA [Cadoz&al 1993] est un système de modélisation et de simulation d'objets physiques, basé sur les principes de l'interaction entre des entités « perceptibles » – via une transduction sonore, visuelle ou mécanique – et de la modularité. Un modèle CORDIS-ANIMA est constitué d'un réseau de modules élémentaires connectés les uns aux autres. Chaque module a une interprétation physique, ce qui garantit la « physicalité » des modèles complets, quel que soit leur degré de complexité.

Les modules CORDIS-ANIMA manipulent deux variables duales représentant des *forces* (F) et des *positions* (X). Ces variables peuvent être des scalaires (version unidimensionnelle du système) ou des vecteurs (version multidimensionnelle). La connexion des modules s'effectue *via* des points de communications, qui sont le lieu d'échange des variables. Ceux-ci sont de deux types (Figure 1) :

- les points « M » reçoivent une somme de forces et renvoient une position,
- les points « L » reçoivent une position et renvoient une force.

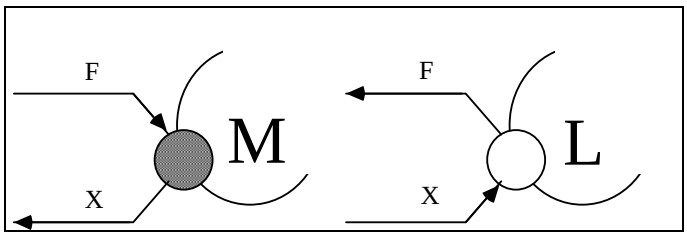


Figure 1 : Les points de communication CORDIS-ANIMA

Lorsque deux points de communication sont connectés, ils échangent leur entrées et sorties respectives (Figure 2). Il est donc clair qu'un point « M » ne peut être connecté qu'à un point « L » et réciproquement. Deux autres règles de connexion s'ajoutent à celle-ci :

- Un point « M » peut être connecté à plusieurs points « L ». Il réalise alors la somme des différentes forces qu'il reçoit pour calculer la position de sortie, qui est envoyée à tous les points « L ».
- Un point « L » doit être connecté à exactement un point « M ».

Un modèle sera dit *simulable* s'il respecte ces règles de construction et peut donc effectivement être simulé.

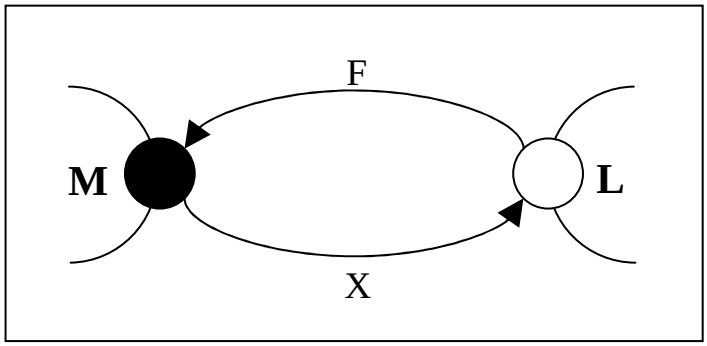


Figure 2 : Connexion d'un point M et d'un point L

Un module CORDIS-ANIMA est un algorithme comportant au moins un point de communication et calculant à chaque étape de la simulation une valeur de sortie en fonction de ses entrées précédentes. Le langage CORDIS-ANIMA permet *a priori* de créer n'importe quel module, avec un nombre quelconque de points de communication de types arbitraires. Cependant, en fonction des règles de construction de CORDIS-ANIMA, seuls deux types de modules élémentaires constituent les bases d'un système de modélisation général permettant d'engendrer une grande variété de modèles. Il s'agit des *éléments matériels* (ou modules <MAT>), qui comportent un seul point « M », et des *éléments de liaison* (ou modules <LIA>), qui portent comportent deux points « L » (Figure 3).

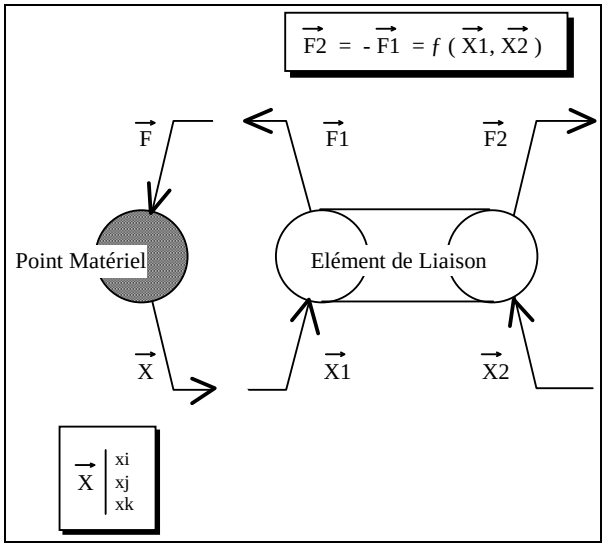


Figure 3 : Les modules élémentaires <MAT> et <LIA>

En décidant que la position X calculée par un module <MAT> en est une propriété intrinsèque, on peut alors considérer que ce module représente un objet physique élémentaire : une masse ponctuelle située dans l'espace de simulation, et dont la position est calculée en fonction des forces qu'il reçoit par

l'intermédiaire de son point M. Un module <LIA> est une liaison entre deux modules <MAT>, sur lesquels il exerce des forces de même intensité et de sens opposé. Ces forces sont calculées en fonction des positions ou des vitesses des modules <MAT> reliés. Un module <LIA> représente donc une *interaction physique* qui respecte le principe d'action-réaction (troisième loi de Newton).

Avec ces types d'éléments de base, CORDIS-ANIMA permet de construire des réseaux de « particules » en interaction d'où le terme de *modélisation physique particulaire* ou *modélisation physique masses-interactions*. Ces réseaux forment des objets virtuels dynamiques, susceptibles de se déformer, d'osciller et permettant de produire, via les transducteurs appropriés, des sons, des mouvements visuels ou des mouvements mécaniques.

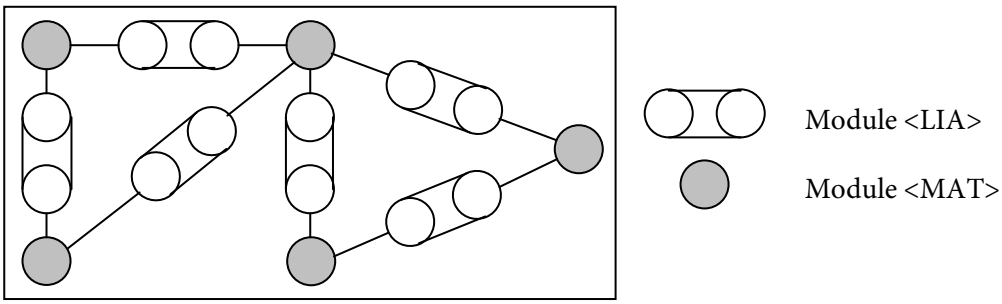


Figure 4 : Un exemple de réseau CORDIS-ANIMA.

1.2. Aspects algorithmiques et unités physiques

Pour les besoins de la simulation numérique, les variables traitées par CORDIS-ANIMA ne sont bien sûr pas continues : il s'agit de suites numériques. La simulation est réalisée de façon synchrone, à une fréquence d'échantillonnage fixe, en deux phases successives pour chaque étape de simulation (cf. [Castagné 2002, p.26] pour une description détaillée) :

- Phase 1 : à l'instant n de la simulation, chaque module <LIA> calcule deux forces opposées de même intensité en fonction des positions courantes et précédentes des modules <MAT> auxquels il est connecté, et les transmet à ceux-ci. Tous les modules <LIA> implémentés à ce jour calculent les forces en fonction des positions à l'instant n ou aux instants n et n-1. Ce deuxième cas correspond au calcul d'une force en fonction de la vitesse des modules <MAT> liés (cf. ci-dessous).
- Phase 2 : chaque module <MAT> calcule sa position à l'instant suivant (n+1) en fonction des forces reçues à l'instant n et la transmet aux modules <LIA> auxquels il est connecté.

Il y a donc un décalage d'une période d'échantillonnage entre le calcul d'une force et son effet sur le module auquel elle est appliquée.

Dans CORDIS-ANIMA, la vitesse courante d'un module <MAT> peut être est en premier lieu définie comme la différence entre sa position à deux instants successifs divisée par la période d'échantillonnage (T_e) :

$$\tilde{V}(n) = \frac{X(n) - X(n-1)}{T_e}$$

Cependant, pour des raisons d'optimisation, l'unité de temps utilisée pour les calculs n'est pas la seconde, mais la période d'échantillonnage (qui est constante), ce qui permet de retirer le terme $1/T_e$

de l'équation ci-dessus et donc d'économiser l'opération correspondante. L'expression de la vitesse utilisée dans les algorithmes est donc :

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

Cette optimisation est en réalité appliquée aux algorithmes de simulation de tous les modules. Par conséquent, la force, la vitesse, la raideur et la viscosité n'ont pas les mêmes unités dans CORDIS-ANIMA que dans le monde réel – l'inertie et la position, quant à elles, sont bien exprimées dans leurs unités habituelles, respectivement le gramme et le mètre. Ceci n'a cependant pas d'incidence dans GENESIS. D'une part, une conversion est effectuée dans l'interface pour la vitesse (de même, évidemment, que pour le temps, qui est exprimé en secondes), de sorte que l'utilisateur n'ait pas à la manipuler dans une unité inhabituelle. D'autre part, en ce qui concerne, la force, la raideur et la viscosité, leurs unités normales sont suffisamment peu utilisées (seuls les physiciens sont amenés à les manipuler « au quotidien ») pour que le changement ne pose aucun problème pratique : l'immense majorité des utilisateurs va prendre comme référence les valeurs proposées par défaut lors de la création des modules et non des valeurs issues du monde réel. Toutefois, si on souhaite modéliser un en partant de valeurs physiques mesurées dans le système d'unités international, la conversion vers les unités CORDIS-ANIMA est très facile à réaliser, puisqu'il suffit pour cela de multiplier par la période d'échantillonnage (pour la vitesse et la viscosité) ou par son carré (pour la raideur et la force).

1.3. Modules élémentaires

Selon l'algorithme réalisant le calcul de la sortie en fonction des entrées, un module CORDIS-ANIMA est susceptible de représenter différents types d'éléments matériels ou d'interactions. C'est la conception de cet algorithme qui assure la « physicalité » du module. Il existe quatre modules élémentaires[22] :

- Le module MAS (de type <MAT>), qui représente un objet ponctuel caractérisé par son inertie. Son comportement est comparable à celui d'une masse ponctuelle en mécanique classique : il respecte les deux premières lois de Newton (principe de l'inertie et principe fondamental de la dynamique).
- Le module SOL (de type <MAT>), qui représente un point immobile, quelle que soit la force exercée sur lui. Il peut être vu comme un module MAS d'inertie infinie.
- Le module RES (de type <LIA>), qui représente l'action d'un ressort linéaire indéfiniment étirable : il calcule deux forces opposées proportionnelles à la distance entre les deux modules <MAT> reliés, selon la loi de Hooke. Le coefficient de proportionnalité entrant dans le calcul des forces est nommé coefficient de raideur et noté K.
- Le module FRO (de type <LIA>), qui représente un frottement de type visqueux : il calcule deux forces opposées proportionnelles à la vitesse relative des deux modules <MAT> reliés. Son action tend à annuler la différence des vitesses de ces modules. Le coefficient de proportionnalité entrant dans le calcul des forces est nommé coefficient de viscosité et noté Z.

De façon générale, un module <LIA> produit des forces qui dépendent soit des positions des modules liés, soit de leurs vitesses, soit d'une combinaison des deux. Un autre module « classique » est le

[22] Nous utilisons ici les noms que portent ces modules dans GENESIS. Ils peuvent être différents dans d'autres implémentations de CORDIS-ANIMA.

module REF, qui est une combinaison des modules RES et FRO : la force qu'il produit est la résultante de la force élastique et de la force de frottement, calculées indépendamment.

1.4. Paramètres et conditions initiales des modules

Les modules CORDIS-ANIMA ont des *paramètres* qui influent sur les valeurs calculées par l'algorithme de simulation. Pour les modules <MAT>, le paramètre le plus courant est l'inertie, notée M. Les modules <MAT> fixes, comme le SOL, n'ont aucun paramètre : en effet, leur algorithme de simulation n'effectue aucun calcul et se contente de renvoyer indéfiniment la même position. Les modules <LIA> peuvent avoir plusieurs paramètres. Nous avons déjà évoqués les plus courants : le coefficient de raideur K et le coefficient de viscosité Z. Il s'agit de valeurs scalaires. De façon plus générale, chaque module <LIA> dispose d'un paramètre conditionnant le calcul de la force en fonction des positions des modules <MAT> qu'il lie et/ou d'un paramètre conditionnant le calcul de la force en fonction de leurs vitesses ; il peut s'agir d'un scalaire ou d'une courbe (cas du module LNL, cf. p. 70). D'autres paramètres peuvent s'ajouter, comme un seuil permettant de conditionner l'activation de l'interaction (cas du module BUT, cf. p. 70).

Dans la plupart des applications de CORDIS-ANIMA, et en particulier dans GENESIS, les paramètres sont fixés lors de la création du modèle et ne varient pas au cours de la simulation. Cependant, la définition du système prévoit l'existence de modules permettant une variation dynamique des paramètres [Cadoz&al. 1993]. Ceux-ci n'ont que rarement été exploités, car leur utilisation peut entraîner l'introduction d'incohérences énergétique et ainsi considérablement complexifier le contrôle du comportement des modèles, notamment en ce qui concerne leur stabilité. De plus, certaines techniques de modélisation permettent de simuler l'effet de variations paramétriques dynamiques [Tache 2004]. De manière générale, ces modules ne sont utilisés que lorsqu'aucune autre solution n'est envisageable.

Par ailleurs, les modules <MAT> ont une position et une vitesse initiales au début de la simulation, fixées par le créateur du modèle : ce sont les *conditions initiales*, notées respectivement X0 et V0.

1.5. Structure d'un modèle CORDIS-ANIMA

Par l'expression « *structure d'un modèle* », on désigne le réseau de modules sous-jacent, en ne s'intéressant qu'à leurs connexions, et non à leurs paramètres ou à leur état. La structure est donc une notion purement topologique et non géométrique ni paramétrique.

On peut représenter la structure d'un modèle par un graphe non orienté dont chaque sommet correspond à un module <MAT> et chaque arête à un module <LIA> ; chaque sommet ou arrête a pour attribut le type du module qu'il représente. Deux modèles ont la même structure si leurs graphes associés sont égaux.

1.6. Nature des modèles CORDIS-ANIMA

Des précautions doivent être prises lorsqu'on évoque la nature des modèles CORDIS-ANIMA. Le fait que les modules élémentaires puissent facilement être comparés avec des objets du monde physique est en effet susceptible d'entraîner un certain nombre de confusion qui seraient nuisibles à la compréhension du système de modélisation et à son apprentissage.

L'exemple le plus flagrant est le cas des modules RES, qu'on est facilement tenté de présenter comme des « ressorts ». Cela ne correspond en rien à la réalité. Les modules RES simulent l'*action* d'un ressort

imaginaire sur deux objets matériels virtuels (deux modules <MAT>), action qui correspond à une *interaction*. Ils ne simulent pas, en revanche, un ressort virtuel, qui est un *objet matériel* ; il faudrait pour cela qu'ils disposent de propriétés supplémentaires, en particulier une inertie et une longueur à vide.

Une autre confusion fréquente est celle qui consiste à considérer les modèles CORDIS-ANIMA comme le résultat d'une discrétisation de lois ou d'objets physiques. Ceci constitue un contresens à double titre.

D'un point de vue historique, tout d'abord : les premiers modèles CORDIS-ANIMA, crées avant même que le système ne soit formalisé, ont été conçus selon une démarche « économique », similaire à celle de Karplus-Strong. Il s'agissait alors de trouver l'ensemble minimal de données et d'opérateurs permettant, par combinaison, de produire les phénomènes oscillatoires indispensables à la synthèse du son et rendant possible la simulation en temps réel avec retour d'effort (d'où le choix des variables force et position comme « piliers » du système). On a ainsi aboutit au développement des quatre modules élémentaires que nous avons présentés ci-dessus. Ce n'est qu'*à posteriori* que les algorithmes de simulation ont été interprétés comme une représentation discrétisée des lois de la mécanique classique – interprétation par ailleurs tout à fait justifiée d'un point de vue scientifique. Dans le cas de CORDIS-ANIMA comme dans celui de la méthode Karplus-Strong, la modélisation physique est « entrée en scène » grâce à une recherche d'économie par rapport aux limitations en termes de puissance de calcul, ce qui en dit long sur l'importance des contraintes matérielles dans l'apparition et le développement de techniques de haut niveau.

Par ailleurs, l'idée que la discrétisation est le principe fondateur de CORDIS-ANIMA entre en contradiction avec le principe de modularité et avec la démarche de modélisation qui en découle. La pratique de ce système se base avant tout sur une approche « constructiviste », dans le sens où les modèles sont généralement construits en partant des modules élémentaires pour aboutir à des modèles élaborés. Il n'est donc nullement question ici, comme on le ferait par exemple avec la méthode des éléments finis, de commencer par considérer un objet continu pour le subdiviser en un certain nombre de sous-parties élémentaires. Même si des liens mathématiques peuvent être établis entre le système CORDIS-ANIMA et les approches basées sur la discrétisation d'équations physiques régissant des phénomènes ondulatoires, il existe une différence fondamentale dans la démarche adoptée pour la création des modèles, voire dans la « philosophie » même de l'utilisation qui est faite de la modélisation physique dans les deux cas.

1.7. Mise en œuvre de CORDIS-ANIMA

Le système CORDIS-ANIMA a, depuis sa définition, été utilisé dans des applications très diverses, que ce soit pour la création musicale, l'animation visuelle, ou la simulation multisensorielle interactive (en général à retour d'effort).

Ces applications se différencient par la façon dont les modules et les modèles sont crées. On distinguera d'un côté l'approche basée sur la programmation et celle faisant appel à un environnement de modélisation et de simulation (ou *modeleur*).

Dans la première approche, le modèle CORDIS-ANIMA est un programme informatique écrit par le modélisateur. La simulation du modèle correspond à l'exécution de ce programme (d'autres programmes pouvant être nécessaires, par exemple pour assurer la communication entre le modèle et une interface gestuelle). Réalisée de cette manière, la création de modèles n'est pas accessible à tous car elle nécessite des compétences en programmation. Elle offre en revanche une grande liberté, en laissant

la possibilité au modélisateur de définir tous les types de modules qu'il souhaite, voire de s'écarter de la définition stricte de CORDIS-ANIMA en cas de besoin. Elle permet par ailleurs d'accorder une grande importance à l'optimisation des algorithmes de simulation, ce qui la rend particulièrement adaptée à la simulation multisensorielle interactive, par exemple dans la cadre du simulateur TELLURIS [Uhl&al. 1995] et de la plateforme ERGON_x [Couroussé 2008].

La deuxième approche est diamétralement opposée à la précédente : les modèles sont crées par assemblage de modules prédéfinis au sein d'un environnement logiciel de modélisation, qui prend également en charge la simulation et propose des fonctions d'aide à la modélisation. Deux modeleurs pour CORDIS-ANIMA ont été développés à ce jour : MIMESIS [Luciani 2002], qui est principalement destiné à la production de mouvements visuels et GENESIS. Ces environnements sont destinés à faciliter la création et la mise au point des modèles et s'adressent en particulier à des utilisateurs n'ayant aucune compétence en informatique. En contrepartie, ils n'offrent pas la souplesse de l'approche par programmation, puisque les différents types de modules qu'ils proposent ne sont pas modifiables.

MIMESIS et GENESIS se distinguent à leur tour par la façon dont les modules sont « manipulés ». Dans MIMESIS, les modèles sont construits de manière textuelle, à l'aide d'un langage simple, principalement déclaratif, permettant la création et la connexion des modules. Dans GENESIS, la création des modèles se fait, comme nous allons le voir ci-dessous, par manipulation graphique directe. Des travaux en cours visent à doter les deux environnements d'un langage commun de création de modèles, beaucoup plus puissant que celui utilisé actuellement dans MIMESIS.

2. GENESIS : un environnement de modélisation et de simulation CORDIS-ANIMA pour la création musicale

Cette section s'attache à la description de l'environnement GENESIS, qui a servi de cadre à l'ensemble de nos travaux. Comme pour la présentation de CORDIS-ANIMA, nous nous contentons d'y aborder les points essentiels pour notre propos. La thèse de Nicolas Castagné [Castagné 2002] constitue la référence en ce qui concerne les choix principaux qui ont été effectués lors de la conception de l'environnement. Il faut noter que GENESIS est un environnement en évolution constante, il ne s'agit donc nullement ici de réaliser une description détaillée de ses fonctionnalités et de son interface, car celle-ci ne serait valable que pour la version 1.6, qui est en utilisation à l'heure où sont écrites ces lignes. Nous insisterons donc principalement sur les principes fondamentaux (espace de simulation unidimensionnel, simulation en temps différé, types de modules, fonctionnalités principales) qui sont conservés d'une version à l'autre.

2.1. Présentation

GENESIS est un environnement logiciel de création musicale basé sur le formalisme CORDIS-ANIMA. Il permet de construire des modèles par manipulation directe graphique des modules : ceux-ci sont crées et connectés entre eux à l'aide de la souris sur un « Etabli » virtuel, qui est la fenêtre principale de l'environnement. GENESIS propose dix types de modules CORDIS-ANIMA (4 modules de type <MAT> et 6 modules de type <LIA>, cf. p. 68), qui sont présentés dans une « palette » permettant à l'utilisateur de sélectionner le type de module à créer.

Les modules <MAT> sont représentés sous la forme de disques pleins, et les modules <LIA> sous la forme de traits. Chaque module a une couleur qui représente sa nature (Figure 5).

L'interface de GENESIS contraint les possibilités de modélisation de telle sorte que les règles de connexion des modules CORDIS-ANIMA sont nécessairement respectées, à l'exception d'un seule : il est possible de créer un module <LIA> sans le connecter à un module <MAT>, ou en ne connectant qu'un seul de ses points L. Les points L non connectés sont représentés par un cercle blanc situé à l'extrémité des modules <LIA> : on les nomme modules « Blancs » (Figure 5). Un modèle contenant un module Blanc n'est pas simulable, puisqu'il ne respecte pas la règle de CORDIS-ANIMA stipulant que tout point L doit être connecté à exactement un point M (c'est-à-dire à un module <MAT>).

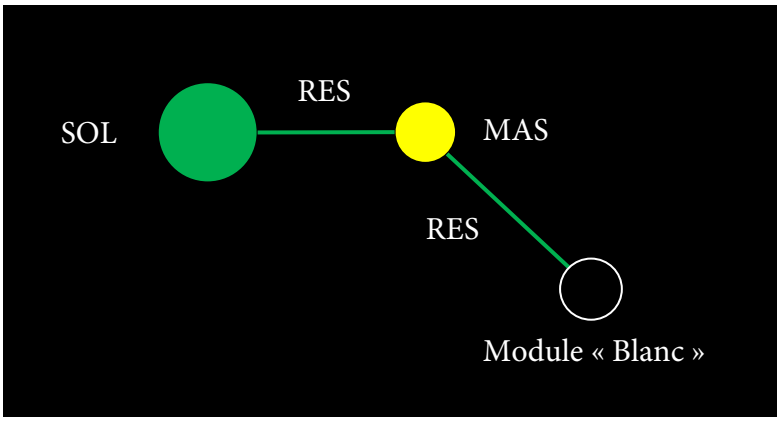


Figure 5 : Plusieurs modules disposés sur l'Etabli GENESIS. Le deuxième module RES n'est pas complètement connecté, ce qui représenté par un module « Blanc »

Les fonctionnalités fondamentales de l'environnement GENESIS, auxquelles s'ajoutent de nombreuses fonctions auxiliaires, sont les suivantes :

- Création et connexion des modules élémentaires.
- Choix des paramètres et conditions initiales des modules ; notons que des valeurs par défaut sont attribuées à ces grandeurs lorsqu'un module est crée.
- Simulation visuelle des modèles.
- Simulation sonore des modèles.

On peut réaliser la simulation d'un modèle entier ou seulement d'une partie de celui-ci, qui aura été au préalable sélectionnée.

La simulation des modèles n'est pas effectuée en temps réel. Par exemple, lorsqu'on choisit d'écouter le son produit, celui-ci est d'abord calculé entièrement et stocké en mémoire avant que l'utilisateur ne puisse l'écouter.[23] Ceci implique qu'il est impossible d'interagir avec le modèle en cours de simulation : GENESIS n'est pas un environnement de simulation interactive. Cette caractéristique a évidemment des conséquences fondamentales sur la manière de l'utiliser pour la création musicale.

2.1.1. Un espace de simulation unidimensionnel

Dans GENESIS, les modules sont simulés dans un espace unidimensionnel. Les modules <MAT> ne peuvent se déplacer que selon une seule dimension (repérée par l'axe de coordonnées X). Les forces sont calculées en fonction des différences de positions ou de vitesses le long de cet axe et elles

[23] Notons que ce calcul peut nécessiter un temps plus ou moins long que la durée du son calculé, selon la complexité du modèle simulé.

s'appliquent uniquement selon celui-ci. Toutes les variables physiques manipulées par GENESIS sont donc des scalaires.

L'espace de simulation est orthogonal au plan de l'Etabli (Figure 6). Par conséquent, la position des modules sur celui-ci n'a absolument aucune influence sur le comportement des modèles – on pourrait même, à la limite, placer tous les modules d'un modèle sur le même point de l'Etabli. Les deux dimensions de l'Etabli n'interviennent pas dans les algorithmes de simulation. Cet espace, purement topologique, a cependant un rôle pratique indispensable : il permet l'organisation visuelle des modèles au cours de leur conception. L'utilisateur de GENESIS est libre de disposer les modules à l'endroit qu'il souhaite dans un espace « neutre », auquel il peut attribuer toute signification qui lui soit utile.

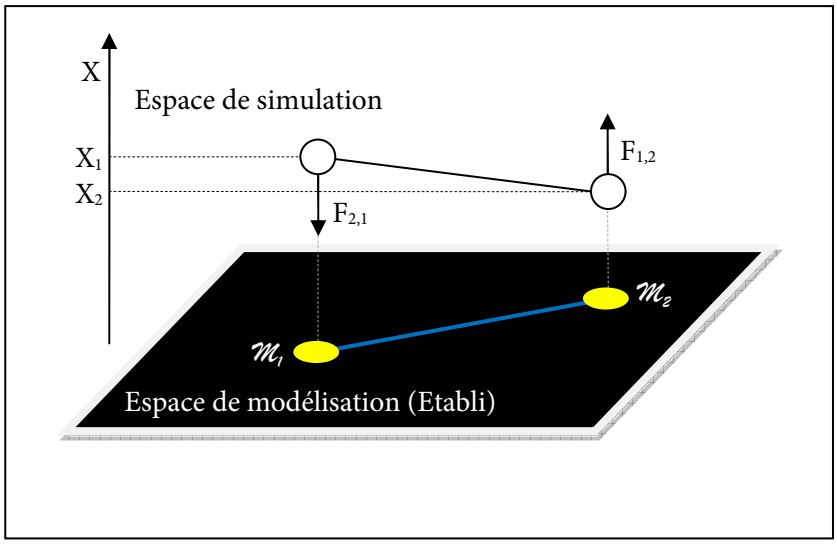


Figure 6 : L'Etabli et l'espace de simulation

L'adoption d'un espace de simulation unidimensionnel est une restriction – volontaire – par rapport à CORDIS-ANIMA, dont la définition n'impose aucune condition sur le nombre de dimensions de l'espace de simulation (par exemple, MIMESIS a un espace de simulation à trois dimensions). Ce choix simplifie considérablement la conception des modèles, à la fois du point de vue cognitif (il est beaucoup plus aisé de se représenter mentalement des mouvements unidirectionnels que multidimensionnels) et du point de vue de l'interface de modélisation (la création de modèles à deux ou trois dimensions nécessiterait la conception d'une interface bien plus complexe, comme celles que proposent les logiciels de modélisation et d'animation 3D). Par ailleurs, et cet argument est de poids, le choix d'un espace de simulation unidimensionnel a un impact considérable sur le coût de simulation des modèles. L'exemple le plus évident est celui du calcul de la distance entre deux modules <MAT> : dans un espace 1D, il est effectué par une simple soustraction, alors qu'il nécessite beaucoup plus d'opérations pour des espaces de dimensionnalité supérieure (par exemple, deux soustractions, deux élévations au carré, une addition et le calcul d'une racine carrée, dans un espace 2D). En contrepartie, ce choix impose des restrictions évidentes sur la généralité des modèles GENESIS, qui ne peuvent pas rendre compte de phénomènes tels que les ondes longitudinales dans la vibration d'une corde. Cependant, l'adoption d'un espace de simulation à une seule dimension a été considéré comme un compromis acceptable vis-à-vis de la complexité et de la diversité des phénomènes qu'il permet d'obtenir, d'autant plus que certaines techniques de modélisation, faisant notamment appel à des interactions non linéaires, produisent des comportements ou des effets caractéristiques d'une dimensionnalité supérieure [Castagné&Cadoz 2000].

2.1.2. Regarder

La fonction « Regarder » de GENESIS permet d'observer la simulation des modèles dans une espace tridimensionnel, composé des deux dimensions de l'espace de l'Etabli et de l'espace de simulation proprement dit. L'utilisateur dispose de contrôles permettant de déplacer le point de vue, de *zoomer* ou encore de modifier la vitesse de défilement du temps – on peut ainsi passer d'une visualisation très ralentie, où chaque étape de la simulation est observable, à une vitesse beaucoup plus rapide.

2.1.3. Ecouter

La fonction « Ecouter » calcule un signal sonore à partir de la simulation du modèle courant, grâce à deux types de modules de sortie : le module SOX (de type <LIA>) qui enregistre les positions successives du module <MAT> auquel il est lié, et le module SOF (de type <MAT>) qui enregistre la résultante des forces auxquelles il est soumis au cours de la simulation. Ces signaux de position ou de force sont directement traduits en signaux sonores. Le son calculé, qui peut ensuite être enregistré dans un fichier, comporte autant de canaux qu'il y a de modules de sortie dans le modèle. La fonction « Ecouter » permet à l'utilisateur de choisir la durée du son à produire, c'est-à-dire la durée de la simulation à effectuer.

Il est important de noter que le signal sonore produit par la fonction « Ecouter » est *normalisé* à la valeur maximale supportée par le format de fichier sonore en sortie. Ainsi, si le comportement de deux modèles diffère uniquement par un facteur d'échelle portant sur l'amplitude de leurs mouvements, les sons produits par leur simulation seront identiques. La normalisation permet d'obtenir des sons audibles à partir de modèles dont les mouvements ont des amplitudes extrêmement faibles et, réciproquement, d'éviter les saturations lorsque ces amplitudes sont très grandes.

2.2. Fonctionnalités avancées

En plus des fonctions essentielles que nous venons de décrire, GENESIS offre de nombreux outils permettant de faciliter le travail de création. Citons en particulier les suivantes :

- « Analyse/Accordage ». Analyse : calcul de l'amplitude, de la fréquence et de la vitesse d'amortissement de chaque mode de vibration d'une partie linéaire d'un modèle, étant donnés un point d'excitation et un point de captation. Accordage : modification de la fréquence d'un des modes de vibration (ce qui a pour conséquence de changer la fréquence de tous les autres modes) par ajustement des coefficients de raideur et de viscosité.
- « Générer » : création automatique de structures de topologie définie, de taille variable (cordes, membranes carrées, spirales, anneaux, etc.).
- « Gestion des ensembles » et « Séquenceur » : ces deux outils, destinés au travail de composition structurelle, permettent d'organiser la succession temporelle d'évènements pour des sous-parties du modèle. Ils permettent d'une part de gérer les Déclencheurs d'un modèle (cf. Chapitre 6, Section 6) et d'autre part de créer des ensembles de modules, ce qui permet de travailler sur les modèles à niveau moins élémentaire que celui des modules isolés.
- « Multiplier paramètres » : modifier simultanément certains paramètres des modules sélectionnés en les multipliant par une valeur constante.

2.3. Aperçu de l'interface

La Figure 7 montre une capture d'écran de l'interface utilisateur de GENESIS (dans sa version 1.6), avec plusieurs fenêtres de dialogues ouvertes. On remarquera en particulier :

- L'Etabli (A)
- La « palette » (B) comportant les dix modules disponibles et les différents outils permettant les manipulations sur l'Etabli (sélection, suppression, rotation, homothétie, etc.).
- Les fenêtres permettant de fixer les paramètres (C) et les conditions initiales (D) des modules sélectionnés.
- La fenêtre « Analyse/Accordage » (E).

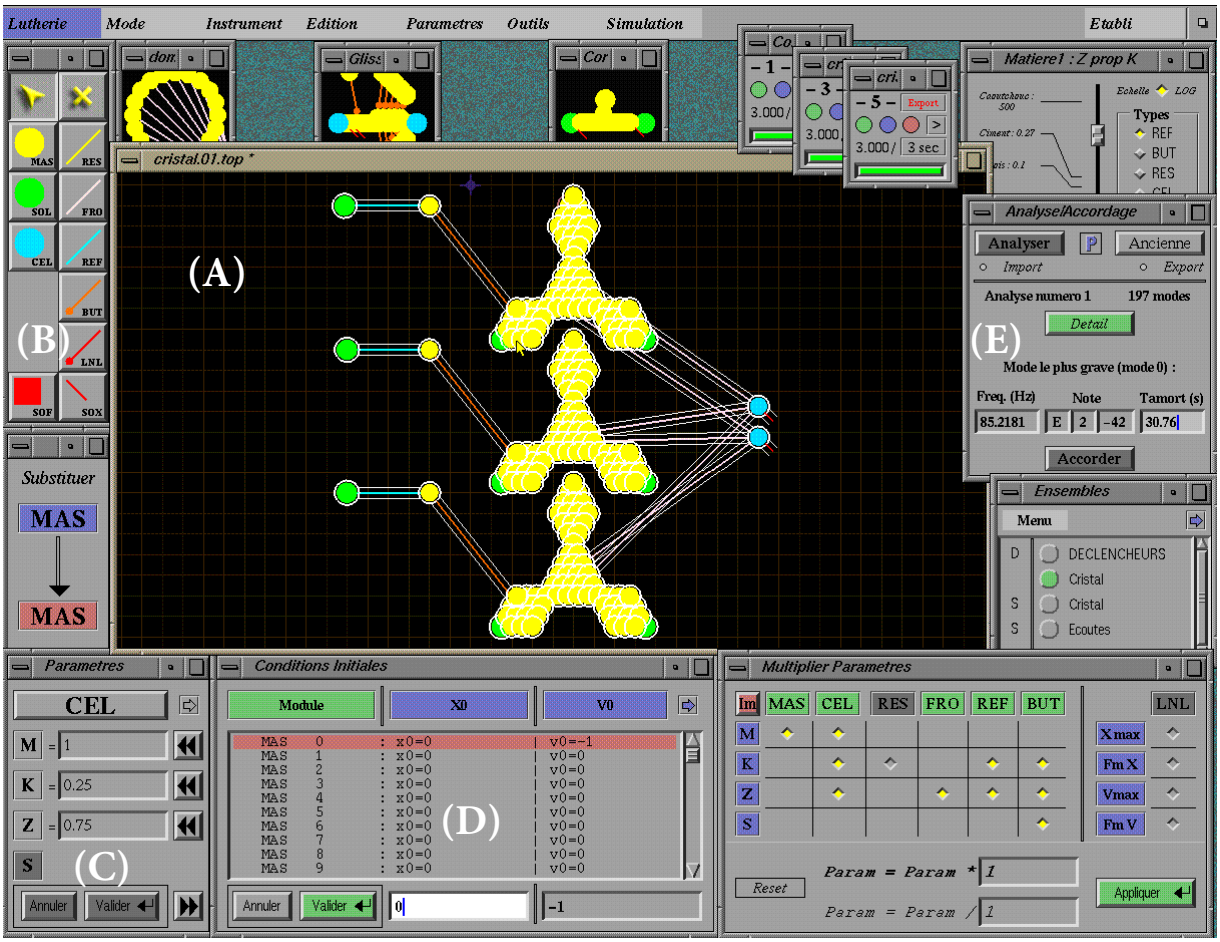


Figure 7 : Vue globale de l'interface utilisateur de GENESIS (version 1.6)

2.4. Les modules élémentaires

Comme nous l'avons dit, GENESIS permet la construction des modèles à partir de 10 modules élémentaires. On donne ci-dessous une description succincte de chaque module ; la liste complète des paramètres et conditions initiales de chacun d'entre eux est présentée en Annexe 1.

Les modules <MAT> sont les suivants :

- Les modules **MAS**, **SOL**, **SOF**, qui ont déjà été introduits.
- **CEL**. Il s'agit d'un « macro-module », c'est-à-dire d'un module qui intègre plusieurs modules élémentaires, en l'occurrence un SOL lié à un MAS par un REF (cf. § 2.4.1).

Les modules <LIA> sont les suivants :

- Les modules **RES** et **FRO**, qui ont déjà été introduits. Notons que le module **RES** simule l'action d'un ressort dont la longueur à vide est nulle. Son action tend donc à ramener à la même position les deux modules <MAT> qu'il relie.

- **REF**. Macro-module combinant un module RES et un module FRO. Il simule donc une interaction viscoélastique.
- **BUT**. Interaction viscoélastique conditionnelle (cf. § 2.4.2).
- **LNL**. Liaison viscoélastique non linéaire orientée, définie par l'utilisateur (cf. § 2.4.3).
- **SOX**. Module se connectant à un seul <MAT> dont il enregistre la position pour produire un signal sonore après normalisation. Il s'agit d'un module <LIA> dit « dégénéré », car il ne dispose que d'un seul point L et renvoie constamment une force nulle.

Les algorithmes de simulation de chacun de ces modules sont donnés par [Castagné 2002, p. 195-198]. Donnons simplement pour exemple ceux des modules MAS, RES et FRO (pour les modules RES et FRO, on considère qu'ils relient deux modules <MAT> nommés $\mathcal{M}_1$ et $\mathcal{M}_2$) :

MAS	$X(n+1) = 2X(n) - X(n-1) + \frac{1}{M} F(n)$
RES	$F_{1,2}(n) = K \cdot (X_1(n) - X_2(n))$
FRO	$F_{1,2}(n) = Z \cdot (V_1(n) - V_2(n))$

Pour l'algorithme du module MAS, X(n) est la position du module et F(n) la somme des forces reçues, à l'instant n de la simulation ; M est l'inertie du module.

Pour les algorithmes des modules MAS et FRO, $F_{1,2}(n)$ est la force exercée par la module $\mathcal{M}_1$ sur le module $\mathcal{M}_2$. K et Z sont respectivement les coefficients de raideur et de viscosité, et $X_i(n)$ et $V_i(n)$ désignent respectivement la position et la vitesse à l'instant n des modules $\mathcal{M}_i$.

Les interactions RES, FRO et REF sont dites *linéaires*, car la force qu'elles calculent est constamment proportionnelle à la distance et/ou à la vitesse relative des modules <MAT> qu'elles lient. Les interactions BUT et LNL, pour lesquelles cette propriété n'est pas vérifiée, sont au contraire *non linéaires*.

2.4.1. Le module CEL

Le module CEL est composé d'un SOL et d'un MAS reliés par un REF. Cette association étant très couramment utilisée dans GENESIS, la regrouper dans un seul module considéré comme élémentaire permet de simplifier les modèles. De plus, l'algorithme qui régit le CEL est optimisé par rapport à un objet SOL+REF+MAS construit explicitement (tout en présentant rigoureusement le même comportement).

Notons qu'un tel objet est un oscillateur harmonique (ou oscillateur du second ordre), amorti ou non selon le coefficient de viscosité du module REF. Dans le contexte de GENESIS, on l'appelle également **Cellule***, en raison de son caractère élémentaire : c'est en effet l'objet le plus simple produisant un mouvement oscillatoire.

Le module SOL intégré au module CEL est situé à la position X=0 ; la condition initiale X0 du module CEL désigne en fait la position initiale de son module MAS intégré. Cette propriété implique que le module CEL ne peut pas être systématiquement utilisé à la place d'un objet SOL+REF+MAS, car on peut souhaiter que l'oscillation d'une Cellule se fasse autour d'une autre position que X=0.

2.4.1.1 L'amortissement critique

Le module CEL comporte trois paramètres : l'inertie M, le coefficient de raideur K et le coefficient de viscosité Z. Lorsque Z est nul, le module a un mouvement sinusoïdal après excitation initiale (en position ou en vitesse). En faisant augmenter Z, ce mouvement devient une sinusoïde de plus en plus amortie. L'analyse de l'algorithme du module CEL montre qu'il existe une valeur particulière de Z, dite « amortissement critique », qui est la plus petite viscosité telle que le mouvement n'est plus oscillatoire [Incerti 1996] : le module retourne vers sa position de repos après l'excitation, sans jamais l'atteindre. Cette valeur de l'amortissement vaut :

$$Z_C = 2 \cdot \sqrt{K \cdot M} - K$$

Pour des viscosités supérieures à Z_C, le retour à la position de repos est encore plus lent.

2.4.1.2 Convergence et divergence des modèles

L'algorithme du module CEL calcule les valeurs successives d'une suite récurrente linéaire d'ordre 2. Celle-ci est susceptible de diverger ou de converger selon les valeurs des paramètres. Pour un module CEL isolé, la suite converge si et seulement si la condition suivante est respectée [Incerti 1996] :

$$K + 2 \cdot Z < 4 \cdot M$$

À l'instar de ce que nous venons de décrire pour l'amortissement critique, cette formule est utilisée hors de son contexte initial afin de déterminer l'ordre de grandeur des valeurs maximum acceptables pour les paramètres d'un modèle – le plus souvent, on se placera nettement en dessous de ces limites pour éviter tout risque de divergence de la simulation. En effet, ce risque n'est pas spécifique au module CEL, il s'étend à tous les modèles, dès lors que les coefficients de raideur ou de viscosité sont trop élevés par rapport aux inerties. En pratique, on utilisera très rarement des modules RES ou REF dont le coefficient de raideur est supérieur à l'inertie minimale des deux modules <MAT> reliés :

Pour tout module élastique : $K < M_{\min}$

Il s'agit d'une règle empirique. La limite exacte de convergence dépend également de la valeur de l'éventuel coefficient de viscosité et des autres forces appliquées aux modules <MAT> en question.

Les valeurs trop élevées de coefficients de raideur ou de viscosité dans un modèle provoquent un gain artificiel d'énergie. Cependant, celui-ci n'entraîne pas nécessairement la divergence de la simulation : il est possible de circonscrire ses effets grâce à des pertes d'énergie suffisantes. Comme nous le verrons dans la partie B de ce document, le fait de jouer avec les limites de stabilité d'un modèle peut se révéler pertinent d'un point de vue sonore.

La question de la cohérence énergétique et de la stabilité des modèles est un problème récurrent en modélisation physique [Välimäki&al. 1995, p. 7]. De fait, toutes les situations physiques imaginables ne sont pas simulables en raison des limites intrinsèques des algorithmes utilisés et du principe même de la discrétisation temporelle.

2.4.2. Le module BUT

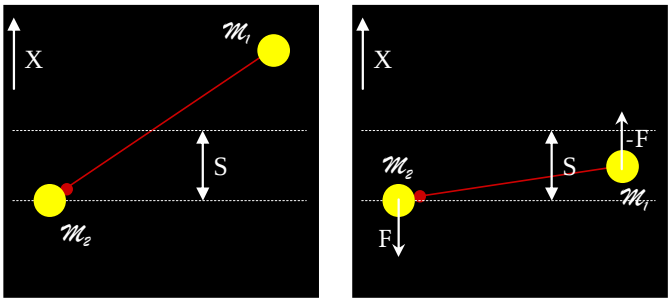
2.4.2.1 Présentation générale

La module BUT est une interaction viscoélastique entre deux modules <MAT> qui s'active lorsque la *différence de leur position* est inférieure à un certain seuil, noté S, qui peut être positif négatif ou nul. Ses paramètres sont le seuil S et les deux coefficients de raideur et de viscosité K et Z.

Le module BUT (aussi appelé « Butée ») permet de modéliser le fait que deux éléments matériels indépendants entrent en contact à un moment de la simulation, lorsque leurs positions répondent à

une condition particulière (en général, lorsque l'un passe en dessous de l'autre, ce qui est le cas lorsque le seuil est égal à 0). Il permet donc, en particulier, de simuler la collision de deux modules <MAT>.

Etant donné que la condition d'activation de l'interaction porte sur la différence de position et non sur la distance entre les modules, on dit que le module BUT est *orienté*. Cette orientation est signalée par un petit cercle rouge placé à l'une de ses extrémités et qui « marque » l'un des deux modules. Lorsque la liaison est active, elle simule l'effet d'un ressort viscoélastique linéaire. Le module BUT peut donc être considéré comme linéaire par « morceaux ». Précisément, le module s'active si la différence entre la position du module non marqué et celle du module marqué est inférieure ou égale à S, soit : X_1-$X_2 \leq S$ (Figure 8).



(a) (b)

Figure 8 : Le module BUT, avec S > 0. (a) Interaction inactive (X_1-X_2 > S). (b) Interaction active (X_1-$X_2 \leq$ S)

2.4.2.2 « L'effet Thil »

« L'effet Thil » (du nom de François Thil, qui a été le premier à l'étudier de façon systématique [Thil 2003]), est un phénomène incohérent du point de vue physique dû à l'échantillonnage temporel. Il se caractérise par un gain aléatoire d'énergie lors d'une interaction non linéaire. Il se produit particulièrement lors de la collision de deux modules <MAT> via un module BUT. Par exemple, lorsqu'un module MAS rebondit contre un module SOL via une butée élastique, il est susceptible de repartir avec une vitesse supérieure à celle qu'il avait avant la collision, ce qui est contraire à la loi de conservation de l'énergie mécanique.

De façon générale, l'effet Thil est dû au fait que l'échantillonnage temporel ne permet pas de prendre en compte les variations brusques d'intensité d'une interaction non linéaire. Il est facile de le mettre en évidence dans la situation représentée dans la Figure 9 :

- A l'instant de simulation n, le module BUT n'est pas activé. Le module $\mathcal{M}_1$ (à droite) a une certaine vitesse V(n) dirigée vers le bas.
- A l'instant suivant (n+1), $\mathcal{M}_1$ a franchi le seuil d'activation, mais il a toujours la même vitesse V(n) car la force exercée par le module BUT ne s'applique que pour le calcul de la position X_1(n+2) et des positions suivantes.

Si la simulation était réalisée en temps continu, l'interaction s'appliquerait à partir du moment où $\mathcal{M}_1$ atteint la position X_d et franchit le seuil d'activation ; sa vitesse commencerait à diminuer dès cet instant. Cependant, en raison de l'échantillonnage temporel, le franchissement du seuil est détecté « en retard ». Par conséquent, à l'instant n+1, $\mathcal{M}_1$ a une vitesse supérieure à celle qu'il devrait avoir : il a gagné de l'énergie mécanique.

L'aspect « aléatoire » du gain d'énergie découle évidemment du fait que, selon le déroulement exact de la situation, la position $X_1(n+1)$ peut être plus ou moins éloignée de X_d. Plus elle en est proche et moins le gain est important.

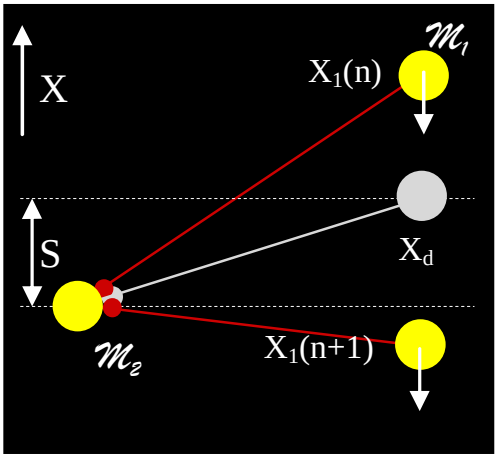


Figure 9 : Cause de l'effet Thil

Il a été montré que pour certaines valeurs du paramètre K du module BUT, l'effet Thil ne se produit pas [Thil 2003]. Il faut donc utiliser ces valeurs lorsqu'on souhaite produire des collisions respectant parfaitement la cohérence énergétique des modèles. Par ailleurs, plus la valeur de K est élevée et plus les gains potentiels d'énergie sont grands. Dans de nombreux cas, ils sont négligeables et on n'a donc pas besoin de calculer une valeur de K permettant d'y échapper totalement.

L'effet Thil existe également pour le module LNL, mais il est plus difficilement observable et en tout cas très difficilement analysable.

2.4.3. Le module LNL

Dans GENESIS, un module LNL est défini par deux fonctions, appelées « caractéristiques » :

- La caractéristique LNLK (ou caractéristique en élasticité) donne la force s'exerçant entre les deux modules <MAT> liés en fonction de la différence de leurs positions Lorsque cette caractéristique est une droite passant par l'origine, le module LNL simule une interaction élastique équivalente à un module RES.
- La caractéristique LNLZ (ou caractéristique en viscosité) donne la force s'exerçant entre les deux modules <MAT> liés en fonction de la différence de leurs vitesses. Lorsque cette caractéristique est une droite passant par l'origine, le module LNL simule une interaction visqueuse équivalente à un module FRO.

Ces fonctions ne sont pas données de manière implicite, c'est-à-dire par une équation mathématique. L'utilisateur les définit en fournissant un nombre fini de points par lesquels elles passent ; leur valeur en chaque point est ensuite déterminée par interpolation. L'édition a lieu dans deux fenêtres différentes :

- La fenêtre *Paramètres* (Figure 10) permet d'éditer les courbes LNLK et LNLZ de manière globale en modifiant leurs échelles horizontale ou verticale – ce qui à multiplier l'abscisse ou l'ordonnée de tous les points par un même coefficient.
- La fenêtre *Edition graphique* (Figure 11) donne à l'utilisateur la possibilité de spécifier les points qui définissent les caractéristiques LNLK ou LNLZ. Les points sont placés soit de manière graphique, à la souris, soit entrant leurs coordonnées numériques. La courbe

complète est construite à partir de ces points selon l'une des trois méthodes d'interpolation disponibles : linéaire, par *splines*, ou hyperbolique. Le menu *Symétrie* permet de rendre la caractéristique symétrique par rapport à l'origine ou à l'axe des ordonnées.

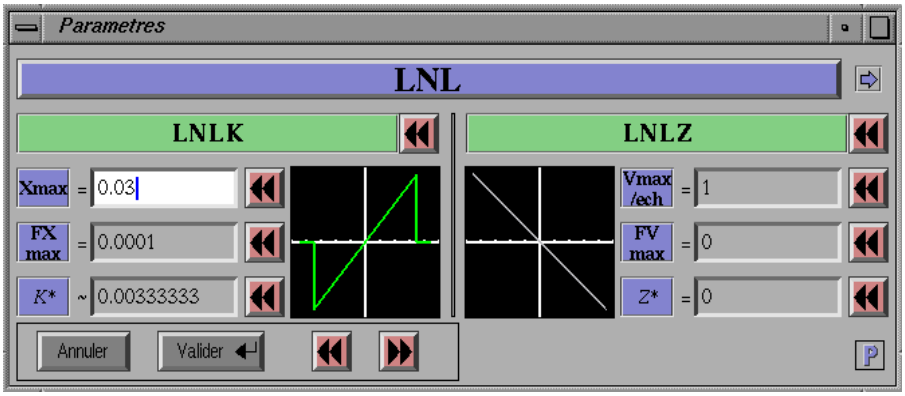


Figure 10 : La fenêtre de paramètres d'une liaison LNL

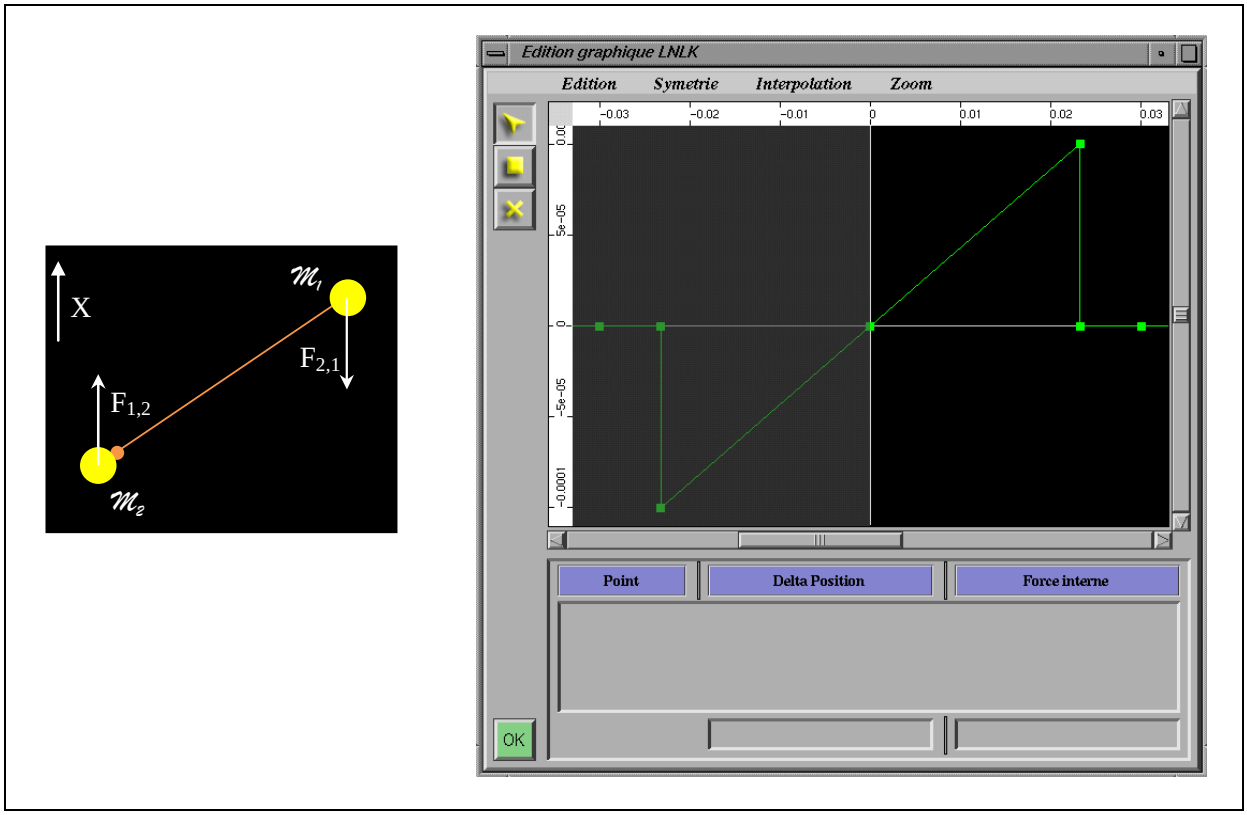
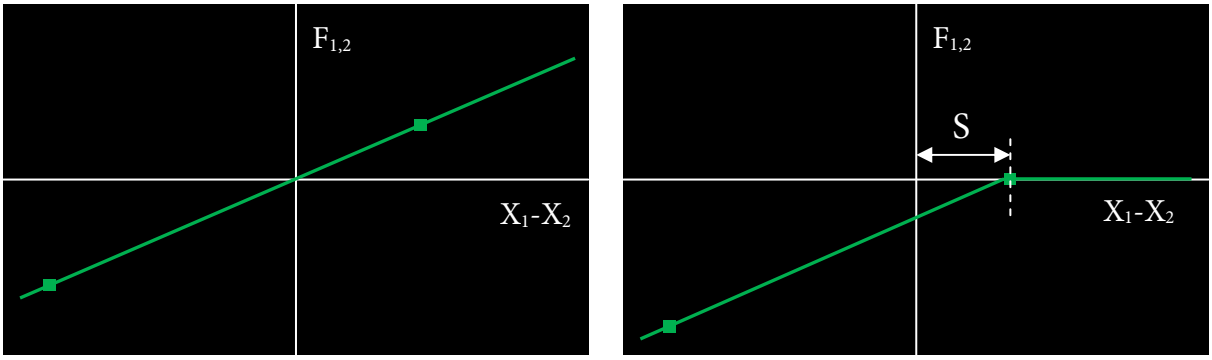


Figure 11 : La fenêtre d'édition graphique de la caractéristique « Différence de position – Force » ou LNLK. La grandeur X_1-X_2 est représentée en abscisses et la force exercée par $\mathcal{M}_1$ sur $\mathcal{M}_2$ ($F_{1,2}$) en ordonnées. La fenêtre d'édition de la caractéristique LNLZ est totalement identique, avec la grandeur V_1-V_2 en abscisses.

Ainsi, le module LNL est complètement configurable par l'utilisateur et peut représenter n'importe quelle interaction, linéaire ou non, dépendant des différences de positions et/ou de vitesses, à l'exception des interactions visqueuses avec seuil de position (ce que permet le module BUT, pour une viscosité linéaire). On peut par exemple concevoir un module LNL strictement équivalent à un module RES (Figure 12-a), à un module REF ou à un module BUT sans viscosité (Figure 12-b). Il est également possible de modéliser des interactions élastiques non linéaires, comme celle illustrée dans la Figure 11.



(a) (b)

Figure 12 : Caractéristiques LNLK de deux modules LNL équivalents à un module RES (a) et un module BUT sans viscosité de seuil S > 0 (b).

Remarque

On appelle « point de fonctionnement » le point d'une caractéristique correspondant à l'état du système à un instant donné de la simulation. Par exemple, dans la caractéristique de la Figure 12-a, le point de fonctionnement se trouve à l'origine lorsque les modules $\mathcal{M}_1$ et $\mathcal{M}_2$ ont la même position.

2.5. Types d'interactions

Les types de modules <LIA> disponibles dans GENESIS sont, comme nous l'avons vu, au nombre de six. Mais les possibilités offertes par le jeu des paramètres, particulièrement avec les modules non linéaires, sont telles qu'il est en réalité possible de créer un nombre très élevé d'interactions de nature différente. Le module LNL permet, par exemple, de modéliser des interactions physiques réelles autres que l'élasticité, comme la gravitation ou une force de van der Waals. Il est donc clair que la palette des interactions disponible, qui inclut également des interactions sans équivalent réel, est loin de se limiter à l'élasticité et au frottement visqueux. Cependant, par commodité de langage, nous continuerons à appeler « interaction élastique » (respectivement « visqueuse ») une interaction dépendant de la différence des positions (resp. des vitesses) des deux modules <MAT> liés, et ce quelle que soit la caractéristique LNLK (resp. LNLZ).

La représentation par deux caractéristiques utilisée pour les modules LNL est une représentation générale pour tous les types d'interactions (y compris les modules linéaires), à l'exception des interactions visqueuses avec seuil d'activation portant sur la position.[24] Nous l'utiliserons donc dans la suite de cette section consacrée à une description générale des principaux types d'interaction. Il est important de noter que pour les liaisons linéaires, la pente de leurs caractéristiques est égale à la valeur des coefficients correspondants (de raideur ou de viscosité). Cela découle directement de la mise en correspondance entre la représentation par caractéristiques et les algorithmes de simulation des modules RES et FRO.

[24] Pour prendre en compte celles-ci, une troisième caractéristique « Différence de position – activation de l'interaction » serait nécessaire.

2.5.1. *Interactions élastiques*

2.5.1.1 Les interactions linéaires.

Les interactions élastiques linéaires représentent l'action d'un ressort idéal, indéfiniment déformable, et parfaitement linéaire. Leur caractéristique en élasticité est une droite coupant l'axe horizontal en exactement un point. On distingue deux cas :

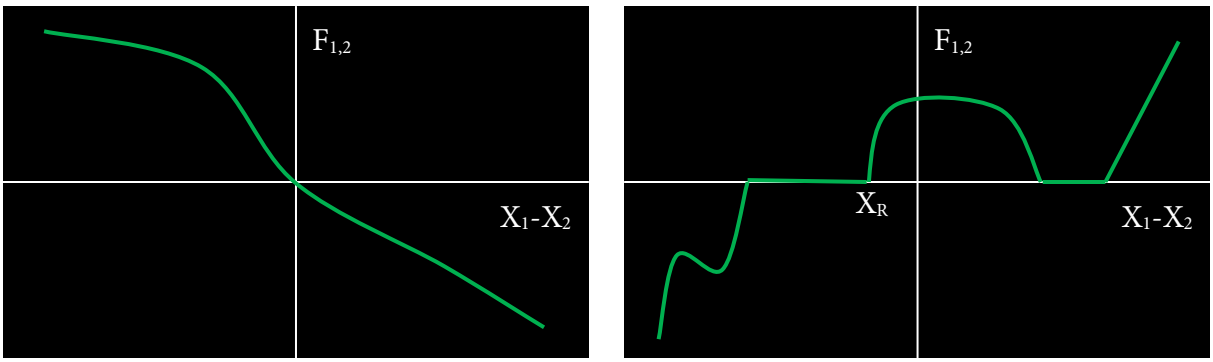
- Si la droite passe par l'origine, le ressort est de longueur à vide nulle. Une telle interaction est réalisée par les modules RES et REF.
- Si la droite ne passe pas par l'origine, le ressort a une longueur à vide égale à l'abscisse de l'intersection avec l'axe horizontal. On ne peut réaliser ce type d'interaction que grâce au module LNL.

Une interaction linéaire est *permanente* : elle exerce une force quelle que soit la position relative des modules reliés, sauf lorsque celle-ci correspond à l'abscisse où la caractéristique d'élasticité s'annule.

2.5.1.2 Les interactions non linéaires.

Deux cas de figure se présentent pour ces interactions, qui ne peuvent être réalisées que par un module BUT ou LNL : soit leur caractéristique d'élasticité est une droite parallèle à l'axe horizontal, ce qui correspond à une force constante, soit elle n'est pas une droite. On pourrait les classifier selon de très nombreux critères portant sur l'allure de la caractéristique. Nous nous contenterons de distinguer deux sous-catégories, qui sont particulièrement significatives du point de vue du comportement des modèles :

- Les *interactions non linéaires permanentes*. Il s'agit des interactions dont la caractéristique d'élasticité s'annule en un nombre fini de points (Figure 13-a). Cette catégorie contient en particulier les interactions modélisant des ressorts non linéaires.
- Les *interactions non linéaires non permanentes*, dont la caractéristique d'élasticité s'annule sur un ou plusieurs intervalles (Figure 13-b). C'est le cas en particulier des modules BUT, ou de la **Liaison piège***.



(a) (b)

Figure 13 : Caractéristique en élasticité d'interactions non linéaires. (a) Elasticité permanente (la caractéristique s'annule en un seul point). (b) Elasticité non permanente (la caractéristique s'annule sur deux intervalles).

Les interactions non permanentes sont utilisées de différentes manières selon les modèles. Certaines ne s'activent qu'un nombre limité de fois en cours de simulation ; c'est par exemple le cas lorsqu'on modélise la percussion d'une structure vibrante par un module MAS à l'aide d'un module BUT. Celui-ci ne s'active qu'une seule fois, pendant la durée de la collision. La durée d'activation est donc

négligeable devant la durée de non activation : on parle d'*interaction ponctuelle*. En revanche, dans certains modèles, les durées totales d'activation et de non activation peuvent être du même ordre de grandeur. On parlera dans ce cas d'*interaction quasi-permanente.* Précisons bien qu'il ne s'agit pas d'une propriété intrinsèque du module <LIA> considéré, mais d'une caractéristique particulière due au contexte précis dans lequel il est mis en œuvre.

2.5.1.3 Interactions attractives et répulsives

Les modules élastiques élémentaires de GENESIS (RES, REF et BUT) sont des interactions attractives (elles attirent l'un vers l'autre les modules <MAT> liés). En réalité, ceci n'est vrai que si le coefficient de raideur du <LIA> est positif, ce qui est le cas par défaut. S'il est négatif (situation qui n'a pas d'équivalent dans le monde réel), les deux modules se repoussent indéfiniment, la force de répulsion augmentant avec la distance. Ils s'éloignent alors l'un de l'autre avec une vitesse qui croît de façon exponentielle, ce qui provoque au bout d'un certain temps le dépassement des capacités de calcul et donc l'arrêt de la simulation. L'utilisation d'un module RES, REF ou BUT à coefficient de raideur négatif est une cause possible de divergence d'un modèle.

Le module LNL permet de créer des interactions attractives ou répulsives. Par exemple, l'interaction dont la caractéristique LNLK est représentée dans la Figure 13-b est répulsive. En effet, lorsque $\mathcal{M}_2$ est située en-dessous de $\mathcal{M}_1$ (soit X_2-X_1 > 0, moitié droite de la caractéristique), la force appliquée sur $\mathcal{M}_2$ est négative, c'est-à-dire dirigée vers le bas : elle tend donc à éloigner encore plus les deux modules, ce qui accroit encore l'intensité de la force. Le module LNL permet également de créer des interactions « localement répulsives », c'est-à-dire qui produisent une force de répulsion sur des intervalles finis. C'est le cas avec la caractéristique illustrée en Figure 13-b (la partie de la caractéristique sur l'intervalle $\{X_R, 0\}$ correspond à une répulsion locale), ou avec la caractéristique ci-dessous (Figure 14). Dans le cas de cette dernière, les modules $\mathcal{M}_1$ et $\mathcal{M}_2$ se repoussent si que leur distance est inférieure à S, et n'interagissent pas sinon. Cette interaction ne conduit par à la divergence du modèle, car elle n'est pas permanente.

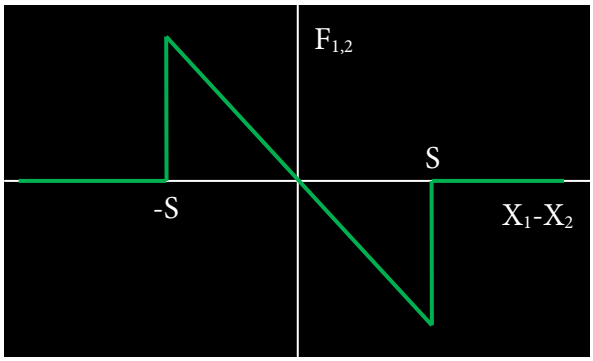


Figure 14 : Caractéristique LNLK d'un module LNL simulant une interaction répulsive avec seuil S.

2.5.2. Interactions visqueuses

La fonction première des interactions visqueuses est de faire perdre de l'énergie mécanique à un modèle, se qui se traduit par un amortissement progressif des mouvements.

La grande majorité des interactions visqueuses utilisées dans GENESIS sont linéaires (modules FRO ou REF) ou linéaires par morceaux (modules BUT). L'utilisation la plus courante d'une interaction visqueuse non linéaire est la simulation de frottements de type archet à l'aide d'un module LNL [Poyer&Cadoz 2007]. Les caractéristiques LNLZ correspondantes ont l'allure générale de celle présentée dans la Figure 15.

Il est possible de créer des interactions visqueuses ayant une viscosité négative, ce qui correspond là encore à une situation n'existant pas dans le monde réel. Ces interactions, dites « à Z négatif », ont pour effet d'accroitre de façon exponentielle la vitesse relative des modules reliés au lieu de la diminuer. Elles créent donc de l'énergie dans le modèle et peuvent ainsi conduire à la divergence de la simulation. Cependant, il est possible de contrôler le gain d'énergie, en soumettant les modules concernés à une perte d'énergie au moins équivalente grâce à une interaction visqueuse à coefficient positif.

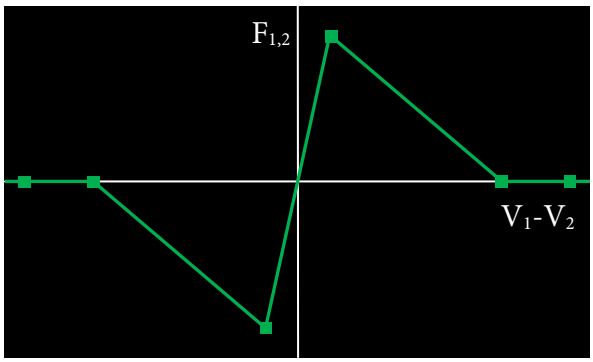


Figure 15 : Caractéristique LNLZ d'un module LNL simulant un frottement d'archet

3. Introduction à la création musicale avec GENESIS

La deuxième partie de cette thèse étant intégralement consacrée à l'étude de la création musicale avec GENESIS, nous nous contentons ici de donner une description très rapide de l'organisation globale des modèles et des différentes approches de la modélisation.

Mais une remarque préalable nous semble judicieuse pour introduire le lecteur à « l'esprit » de la création musicale avec GENESIS :

On peut établir un certain parallèle entre la musique concrète et l'utilisation de GENESIS pour la création musicale. Là où la musique concrète opère sur des *objets sonores* à travers la manipulation de d'un support (historiquement, la bande magnétique), GENESIS, se situe en amont de cette démarche – c'est-à-dire avant l'enregistrement du son – et propose à l'utilisateur de créer et de composer des *corps sonores* simulés.[25] Toutefois, le système CORDIS-ANIMA permet d'aller plus loin que cette « lutherie virtuelle », aussi intéressante soit-elle. Comme nous l'avons souligné à plusieurs reprises, les modèles physiques ne simulent pas nécessairement des corps sonores, mais peuvent également avoir des mouvements situés à l'échelle macro-temporelle, qui peuvent eux-mêmes être composés. Ainsi les modèles GENESIS (et les modèles musicaux CORDIS-ANIMA en général) mélangent-ils corps

[25] Le travail sur les corps sonore, dont l'application la plus rigoureuse est la fabrication d'instruments acoustiques, est évidemment possible dans la réalité. GENESIS offre un champ d'expérimentation différent et, dans un certain sens, plus large grâce à deux propriétés. D'une part, la rapidité de « façonnage » des corps sonores virtuels est largement supérieure à ce qui est réalisable dans le monde réel, où l'on ne peut pas faire et défaire des objets en quelques secondes comme le permet la modélisation physique. D'autre part, la modélisation offre la possibilité inédite de modifier à loisir (là encore de façon très rapide) les propriétés des matériaux virtuels employés, de passer, par exemple, du « bois » au « métal » en quelques opérations de paramétrage. Bien évidemment, on ne peut se contenter de comparer aussi simplement deux pratiques de nature si différente. La lutherie réelle offre une finesse de travail que peut-être aucun système de modélisation n'atteindra jamais, d'autant plus qu'elle est irrémédiablement liée au savoir faire gestuel. Nous ne faisons que souligner ici ce que CORDIS-ANIMA apporte de nouveau, sans oublier ce qu'il enlève.

sonores virtuels et « corps macro-temporels », les objets des deux catégories étant crées à l'aide du même formalisme et selon les mêmes techniques.

3.1. Organisation générale des modèles

La pratique de la création musicale dans GENESIS s'appuie uniquement sur les modules élémentaires et les fonctionnalités associées que nous venons de présenter. L'environnement ne propose à l'utilisateur aucun moyen de manipuler la musique ou le son à un niveau symbolique. Toutes les structures sonores et musicales sont produites par la simulation des modèles, émergeant des paramètres et des conditions initiales physiques choisies par l'utilisateur.

Un modèle GENESIS est composé d'un certain nombre de composants qui réalisent différentes fonctions, chacun contribuant à un aspect du résultat sonore de la simulation, que cela soit à l'échelle acoustique ou macro-temporelle. Il dispose bien entendu d'au moins un composant – correspondant fonctionnellement à la structure vibrante des instruments acoustiques – chargé de produire les oscillations acoustiques qui donnent naissance au son résultant de la simulation. Le plus simple de ces composants est la Cellule, qui engendre un son pur composé d'une seule harmonique. Les « **Cordes*** », « Membranes » et autres « Cylindres », qui sont des composants standards, proposent des timbres plus riches (Figure 16). Il ne s'agit là que de quelques exemples parmi l'ensemble des objets réalisables.

Notons que, comme pour les instruments acoustiques, la taille de la « structure vibrante » à une influence directe sur la fréquence des sons produits : plus elle est importante et plus la fréquence fondamentale sera grave. Bien sûr, dans le contexte de GENESIS, la notion de taille n'a pas un sens géométrique puisque l'espace de conception des modèles est purement topologique : elle est relative au nombre de modules <MAT> mobiles d'un objet. Une Corde composée de 10 modules MAS a une fréquence fondamentale plus haute qu'une autre Corde composée de 50 modules, tous leurs paramètres étant par ailleurs égaux.

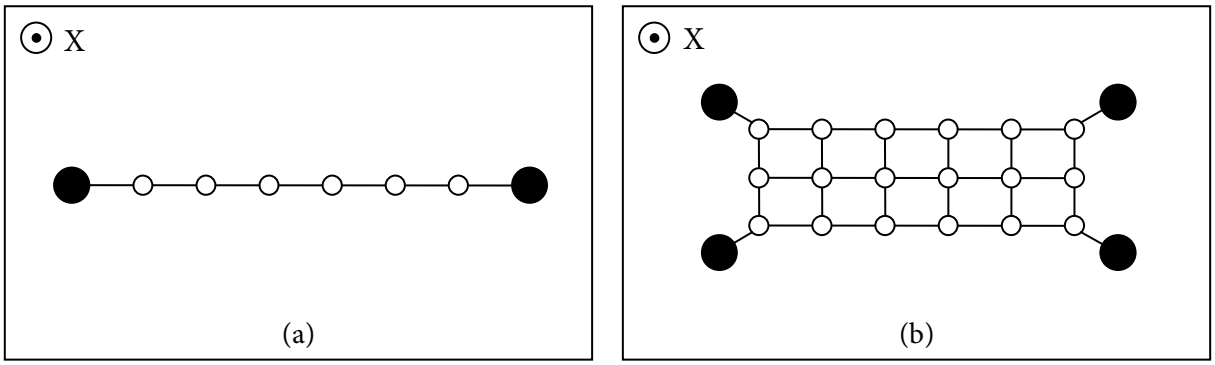


Figure 16 : Deux objets acoustiques simples : une Corde (a) et une Membrane (b).

Les modèles doivent également comporter des composants permettant de capter les oscillations produites grâce aux modules SOF ou SOX, mais aussi des composants chargés de « jouer » des objets acoustiques, c'est-à-dire, au minimum, de les mettre en vibration. Il peut s'agir d'excitateurs simples (comme un **Percuteur élémentaire***) ou d'objets simulant des gestes instrumentaux, comme le **Batteur***. Ces objets engendrent par leur comportement des structures musicales plus ou moins complexes. Ils se situent au niveau macro-temporel. Au même titre que les objets acoustiques, ils peuvent interagir entre eux ou être eux-mêmes « joués » par d'autres objets, qui vont produire des structures musicales d'un niveau supérieur. L'appartenance d'un objet CORDIS-ANIMA au niveau acoustique ou au niveau macro-temporel ne dépend que de ses paramètres, et non de sa structure. Une

Membrane, comme celle illustrée dans la Figure 16-b, peut aussi bien être un objet acoustique qu'un objet macro-temporel, en fonction du rapport entre la raideur de ses interactions internes et l'inertie de ses modules <MAT>, qui fixe sa fréquence de vibration.

La complexité des modèles, qu'on peut définir par le nombre de composants différents présents en leur sein, n'est limitée que par les contraintes techniques de l'environnement. En effet, plus le nombre de composants (et donc de modules) est important et plus le temps de calcul nécessaire à la simulation est élevé. Ceci n'empêche pas certains utilisateurs de réaliser des modèles comportant plusieurs milliers de modules, comme celui qui produit la pièce *pico*..TERA (Claude Cadoz, 2002) [Cadoz 2002b].

3.2. Stratégies de modélisation

L'utilisation d'un système de modélisation physique comme CORDIS-ANIMA pose évidemment la question du rapport entre l'objet et le modèle qui en est réalisé. Il s'agit là d'une problématique relevant de l'épistémologie, qui déborde largement le cadre de notre sujet.

Par sa nature même, le système CORDIS-ANIMA est principalement destiné à la *modélisation structurelle* [Cadoz 1990], c'est-à-dire à la construction de modèles dont la structure reflète celle de l'objet modélisé. Dans le cadre de GENESIS, cette démarche doit composer avec le fait que l'espace de simulation est unidimensionnel et que les modèles ont une structure topologique et non géométrique : le modélisateur est alors amené à étudier la réductibilité de cette structure dans un espace comportant moins de dimensions que celui d'origine. Pour retrouver certains comportements dépendant spécifiquement de ces dimensions « manquantes » (comme, par exemple, la non linéarité des cordes pour des fortes amplitudes de vibration), il peut alors adopter une démarche de *modélisation fonctionnelle* [Cadoz 1990] qui, se combinant à une modélisation structurelle « réduite », reproduit le phénomène voulu par un mécanisme artificiel, étranger à sa cause dans le monde réel. Par ailleurs, la modélisation structurelle « stricte » est parfois impossible du fait que le nombre de modules utilisables dans un modèle peut ne pas être suffisant. Ainsi, le système CORDIS-ANIMA peut en théorie représenter un écoulement d'air dans une cavité (en représentant chaque molécules du gaz par un module <MAT>), rendant possible une modélisation structurelle des instruments à vent. Bien entendu, dans la pratique, la quantité de modules nécessaires à un tel modèle est bien trop élevée pour que le temps de simulation soit raisonnable.[26] La modélisation des instruments à vent avec CORDIS-ANIMA se fait alors par le biais d'une analogie entre les variables mécaniques (vitesse, force) et acoustiques (pression, flux volumique). Il s'agit toujours d'une modélisation structurelle, mais qui se place au niveau de la propagation des ondes et non plus au « niveau moléculaire ».

Tenter de reproduire la structure exacte, tridimensionnelle, d'un objet réel est une attitude extrêmement courante chez les utilisateurs débutants de GENESIS, qui éprouvent souvent une certaine difficulté à comprendre que l'Etabli n'est pas une espace géométrique et que la simulation des modèles est unidimensionnelle. La prise en compte de ce fait est absolument capitale pour le développement du « discours didactique » entourant GENESIS. En essayant d'établir un lien aussi direct entre les corps sonores réels et les modèles, les utilisateurs cherchent à retrouver leurs marques dans un environnement qui leur est, pour la plupart, complètement étranger. Par ailleurs, cette démarche est sans doute en partie influencée par l'image couramment véhiculée par les médias – voire par les chercheurs eux-mêmes – de l'ordinateur capable de reproduire l'univers tout entier pour le mettre à

[26] En outre, la manipulation de quantités considérables de modules (au-delà de quelques milliers) nécessite des outils adaptés. Le développement du langage textuel pour la création et le paramétrage des modèles que nous avons déjà évoqué constitue une réponse à ce problème.

notre portée. L'idée de simulation réaliste et, plus généralement, les réalités virtuelles, exercent une véritable fascination (que Cadoz considère comme le « miroir de l'anthropomorphisme » [Cadoz 2002c]) dont l'influence se fait naturellement sentir dans l'approche du public vis-à-vis de la modélisation physique. Cependant, cette démarche de construction des modèles se révèle la plupart du temps décevante, car CORDIS-ANIMA n'est pas un outil de *reproduction* de la réalité mais de *modélisation*, ce que l'utilisateur va devoir comprendre, parfois à ses dépens. Or, la modélisation introduit nécessairement des différences fondamentales, aussi bien qualitatives que quantitatives, avec la réalité. Obtenant des sons relativement similaires (ce qui découle directement du fait que des valeurs sont attribuées par défaut aux paramètres des modules crées) avec des modèles en apparence très différents, les utilisateurs ont tôt fait de réaliser que la structure des objets acoustiques est loin d'être le seul facteur influant sur le timbre. Ils peuvent alors passer à l'exploration des différents modes d'excitation et à l'expérimentation portant sur les valeurs des paramètres physiques, qui leur réservent des découvertes souvent bien plus saisissantes.

Au cours de l'apprentissage de GENESIS, l'utilisateur apprend progressivement les « règles » de cet « univers » particulier. Il est alors capable de pratiquer avec une efficacité croissante la modélisation sans se référer explicitement à des objets ou des phénomènes réels, mais en exploitant les propriétés des modules élémentaires en eux-mêmes. Bien sûr, la nature même de CORDIS-ANIMA implique que les concepts, objets virtuels et paramètres manipulés lors de la création d'un modèle renvoient continuellement l'utilisateur à sa propre expérience du monde physique, et c'est bien là l'un des avantages de cette méthode de création. Cependant, il ne s'agit plus dans cette démarche de conception de modéliser un objet réel, mais de construire de toutes pièces des modèles pour leurs propriétés intrinsèques, prévisibles grâce aux connaissances acquises par la pratique ou l'analyse. GENESIS est abordé comme un « atelier de lutherie virtuelle », dans lequel on adopte une approche expérimentale, exploratoire, sans nécessairement se préoccuper de la plausibilité physique des modèles construits. On est alors dans une situation inversée par rapport à la modélisation physique « normale », car on en vient quasiment à chercher dans le monde réel ce que le modèle peut bien représenter… Il est même parfois impossible de trouver la réponse à cette interrogation, parce que le modèle fait appel à des interactions qui n'existent pas (même si elles respectent une cohérence physique élémentaire).

C'est à ce moment que la notion de *métaphore* intervient de façon déterminante, et ce dans deux sens complémentaires. D'une part, on peut souvent comparer un phénomène propre à un modèle CORDIS-ANIMA à un objet ou à un phénomène réel : par exemple, un frottement à viscosité négative peut être présenté comme un « moteur ». Il n'y a là aucune modélisation structurelle ; on peut, à la limite, parler de modélisation phénoménologique, dans le sens où l'un comme l'autre fournissent de l'énergie à un système physique. D'autre part, le modèle que l'utilisateur crée sans se référer à un quelconque objet réel peut « tout simplement » être la représentation d'un objet physique imaginaire, voire d'un concept plus abstrait. Le mouvement d'un module MAS peut ainsi à la fois *symboliser* pour le compositeur une idée musicale (une dynamique, une évolution, en bref : une structure), et la *réaliser* physiquement. Il nous semble que cet aspect – qui mériterait une discussion plus importante – est au cœur même du paradigme de la création musicale par modélisation physique.

4. Axes de recherches

Les travaux réalisés autour de la création musicale avec CORDIS-ANIMA ne se limitent pas à la définition du système et au développement d'outils permettant la construction de modèles et leur simulation. Pour les raisons que nous avons déjà évoquées, on ne peut se contenter de fournir ce strict minimum aux musiciens souhaitant pratiquer CORDIS-ANIMA.

Des travaux de recherche et de développement ont donc été menés dans les directions suivantes :

Approches analytiques générales
Ces travaux ont pour objectif principal l'étude des propriétés générales des objets CORDIS-ANIMA pour la création musicale et des méthodes permettant de contrôler celles-ci (cf. § 4.1).

Développement de modèles
Dans cet axe de recherche et de développement, il s'agit de développer des modèles dans le cadre d'une certaine thématique prédéfinie ; la portée des travaux correspondants est donc moins générale que dans le cas précédent. Les objectifs fixés sont très variables. Il peut s'agir de la modélisation d'un phénomène très général, comme l'excitation par percussion [Fourcade 2001] avec des applications plus spécifiques (génération de consonnes [Fourcade 1999]), de la production de sons particuliers (sons évoquant l'eau [Pirot&Toussaint 2004], sons bruités [Novello 2004]), du développement de modèles permettant la production de structures rythmiques [Munoz 2005], ou encore de la modélisation d'instruments acoustiques, comme les instruments à vent [Poyer 2007]. Depuis 2003, les différents travaux réalisés dans cet axe de recherche font partie de l'*Atelier Instrumentarium*, un programme de recherche consacré à la constitution d'une librairie de modèles couvrant un large domaine sonore et musical, dont une partie est susceptible d'être distribuée avec GENESIS (cf. Section 5.2).

Dans tous ces travaux, l'accent est bien sûr mis sur la modélisation, ce qui n'empêche pas que l'outil mathématique soit très fréquemment utilisé pour étudier l'objet à modéliser ou les modèles réalisés. Par ailleurs, une attention toute particulière est accordée à l'aspect didactique, étant donné que certains des modèles produits seront mis à la disposition d'autres utilisateurs ; cela se traduit par exemple par un effort plus important consacré à l'identification et à l'analyse du rôle de leurs paramètres.

Approche systémique
Dans cet axe de recherche, qui est le cadre de cette thèse, on étudie à un niveau plus abstrait que précédemment les propriétés de CORDIS-ANIMA et de GENESIS. Les résultats des approches analytiques et les modèles déjà développés sont considérés comme des « données » à partir desquelles on tente de formaliser une organisation globale des modèles, à la fois au niveau de leurs composants internes et des relations entre les modèles (ce qui peut conduire, par exemple, à en proposer une ou plusieurs classifications). Cette approche est comparable à l'organologie, à la différence près qu'elle ne prend pas seulement en compte des objets qui jouent le rôle d'instruments, mais aussi des objets qui se situent au niveau macro-temporel.

Conception et développement de l'environnement GENESIS
La conception de GENESIS (et plus généralement des environnements de modélisation pour CORDIS-ANIMA) constitue un véritable sujet de recherche dans le domaine des Interfaces Homme-Machine et non un simple développement informatique, dans la mesure où aucune interface équivalente à un système de modélisation physique n'existait auparavant. Ce travail a d'ailleurs fait l'objet d'une thèse [Castagné 2002], dans laquelle les choix fondamentaux sont justifiés par une étude minutieuse du processus de modélisation au niveau pratique, par le biais d'une analyse des tâches correspondantes (cycle « conception – simulation – observation des résultats – modification » ; utilisation des différentes fonctionnalités de l'environnement, etc.).

4.1. Approches analytiques

Les travaux relevant d'une approche analytique tentent de répondre à des questions fondamentales posées par la création musicale avec CORDIS-ANIMA au niveau des propriétés des modèles et du contrôle de celles-ci : ils visent globalement à doter la synthèse sonore par modélisation physique de

moyens d'analyse, dont nous avons souligné l'importance à plusieurs reprises. Dans leur majorité, ces études portent sur un aspect relativement précis (étant bien entendu qu'un « aspect précis » peut représenter un domaine immense à explorer), comme les propriétés des structures vibrantes [Incerti 1996], la synthèse modale [Djoharian 1993], la « signature sonore » des matériaux simulés [Djoharian 1999], pour ne citer que quelques uns des travaux les plus significatifs. Généralement, ces travaux sont marqués par une forte orientation mathématique. Réalisés pour la plupart à une époque où l'environnement GENESIS n'existait pas encore ou n'en était pas au stade de développement actuel (c'est-à-dire celui d'un outil pleinement opérationnel), ils restent relativement éloignés de la problématique de la création proprement dite et ne sont pas encore connectés à une pratique musicale bien établie.

Ces travaux ont eu des répercussions concrètes sur le développement de GENESIS, puisqu'un certain nombre de leurs résultats ont donné naissance à des outils intégrés dans l'environnement, comme les fonctions « Analyse/Accordage », « Générer » et « Matière »[27].

Plus récemment, deux études particulières relevant d'une approche analytique ont été réalisées. La première vise à augmenter les possibilités de la fonction « Analyse/Accordage », en rendant possible l'accordage indépendant des modes de vibration d'une structure linéaire [Villeneuve 2008]. Par ailleurs, Alexandros Kontogeorgakopoulos a réalisé une comparaison systématique entre CORDIS-ANIMA et d'autres représentations numériques de systèmes physiques, dans le cadre d'une thèse visant à développer des transformations sonores grâce à CORDIS-ANIMA [Kontogeorgakopoulos 2008] – thèse qui se situe donc « à cheval » entre une approche analytique et le développement de nouveaux modèles.

Ces approches ont permis le développement d'outils d'analyses portant sur certains aspects des modèles GENESIS (en particulier les structures linéaires) mais on ne dispose pas d'outils permettant le paramétrage et, *a fortiori*, la génération automatiques de modèles à partir de mesures effectuées sur des instruments réels ou de signaux sonores. Les travaux menés dans ce sens ont fait appel à la technique des réseaux de neurones artificiels [Szilas&Cadoz 1998]. Ils ont montré la possibilité de faire apprendre un comportement donné à un modèle CORDIS-ANIMA considéré comme un réseau de neurones. Cependant, cette démarche se heurte à d'importantes difficultés techniques qui rendent les méthodes proposées actuellement inutilisables en pratique.

4.2. Approche systémique

Les approches analytiques ne dressent pas à elles seules un tableau global de la création musicale avec CORDIS-ANIMA ou GENESIS, faute d'un point de vue suffisamment large et, en particulier, d'une prise en compte des questions spécifiques liées à la composition. En outre, les connaissances ainsi obtenues sont trop hétérogènes pour « faire système ». Dans l'optique d'une diffusion à large échelle de l'environnement GENESIS (ou d'autres outils de création musicale basés sur CORDIS-ANIMA) auprès d'un public non initié à la modélisation physique (ni même à la notion de modélisation), il est évident que ces connaissances doivent être préparées et reliées en elles avant de pouvoir être présentées.

L'approche systémique de la création musicale avec CORDIS-ANIMA vise donc à compléter ce tableau, en synthétisant les résultats analytiques et les informations recueillies à partir des nombreux

[27] Cette fonction permet de paramétrer automatiquement le rapport entre les raideurs et les viscosités d'une « structure vibrante » de façon à la doter de propriétés comparables à certains matériaux (diamant, métal, bois, etc.).

modèles GENESIS réalisés. Elle s'est développée dès la fin des années 90, à partir du moment où l'environnement a atteint un degré de développement suffisant pour qu'une réelle pratique musicale, régulière et conduisant à la production d'œuvres abouties, a été possible.

4.2.1. La hiérarchisation Brutel

4.2.1.1 Présentation

La première proposition d'une vision globale de la création avec GENESIS se trouve dans le « Manuel d'utilisation pour GENESIS » établi par Claire Brutel-Vuilmet et Claude Cadoz en 2001 [Brutel&Cadoz 2001]. Le titre de ce document indique clairement son orientation vers l'utilisateur. Il est cependant trompeur : il ne s'agit pas en effet d'un manuel au sens usuel du terme, dans la mesure où son objectif n'est pas de décrire les fonctions d'un logiciel et la façon de les utiliser, mais plutôt d'un catalogue qui recense un certain nombre d'informations permettant à l'utilisateur de commencer l'apprentissage de GENESIS et de disposer d'une vue d'ensemble de ses possibilités.

Cette vision globale est exposée dès le début du document dans une partie intitulée « Hiérarchisation des éléments ». Celle-ci présente une catégorisation hiérarchique des composants d'un modèle GENESIS (Figure 17), directement inspirée de la « chaîne instrumentale » réelle, c'est-à-dire de l'enchaînement d'éléments de diverses natures qui mène du geste instrumental au son perçu. Cette notion est prise dans un sens plus large, puisqu'elle comprend un élément, appelé « Chef » en référence au chef d'orchestre, dont le rôle est de commander les « Instrumentistes » du modèle. On remarque que la structure vibrante est envisagée ici comme le cœur des modèles, dans la mesure où les composants qui l'entourent sont présentés comme étant situés « en amont » ou « en aval » de celle-ci.

La suite du Manuel consiste principalement en un catalogue de composants donnés en exemple pour illustrer chacune des classes identifiées. Ces exemples sont accompagnés de règles d'utilisation, plus ou moins formelles, facilitant le paramétrage des modèles.

Le Manuel se termine par des exemples de techniques de couplage entre structures vibrantes, puis par un ensemble de considérations divers, concernant l'accordage des structures, les spécificités des structures non homogènes, les échelles, la nomenclature des modèles et les différentes représentations utilisées dans le contexte de GENESIS.

Ce document se distingue clairement des travaux antérieurs par le fait qu'il s'agit d'une première tentative d'organisation globale des connaissances portant sur la création musicale avec CORDIS-ANIMA, et par sa cible, c'est-à-dire les utilisateurs de GENESIS. Il aborde, sans les distinguer explicitement, de nombreux aspects de ces connaissances, de la description des modules élémentaires à la façon de contrôler le tempo d'un oscillateur, en passant par les différents types de structures vibrantes. C'est la première étude relevant d'une *approche systémique* de la création musicale avec CORDIS-ANIMA, et non d'une approche analytique.

Plus important encore, l'inclusion dans la hiérarchie des types de composants des catégories « Chef » et « Instrumentiste » (ces dénominations devant être prises dans un sens métaphorique étant donné le gouffre qu'il existe entre ces notions dans GENESIS et leurs référents réels) témoigne pour la première fois d'une prise en compte des possibilités concernant la composition.

Ces possibilités sont mises en œuvre dans *pico..TERA* de Claude Cadoz, première pièce musicale réalisée entièrement par modélisation physique masses-interactions [Cadoz 2002b]. D'autres créations avaient auparavant utilisé GENESIS, mais seulement en tant que synthétiseur de sons. Dans *pico..TERA*, des « Chefs » et des « Instrumentistes » produisent complètement la structure musicale, tandis que la génération du son est effectuée à l'aide d'excitateurs, de structures vibrantes d'éléments

de couplage et de **Chevalets***. Une grande partie des types de composants identifiés dans le Catalogue Brutel est ici utilisée.

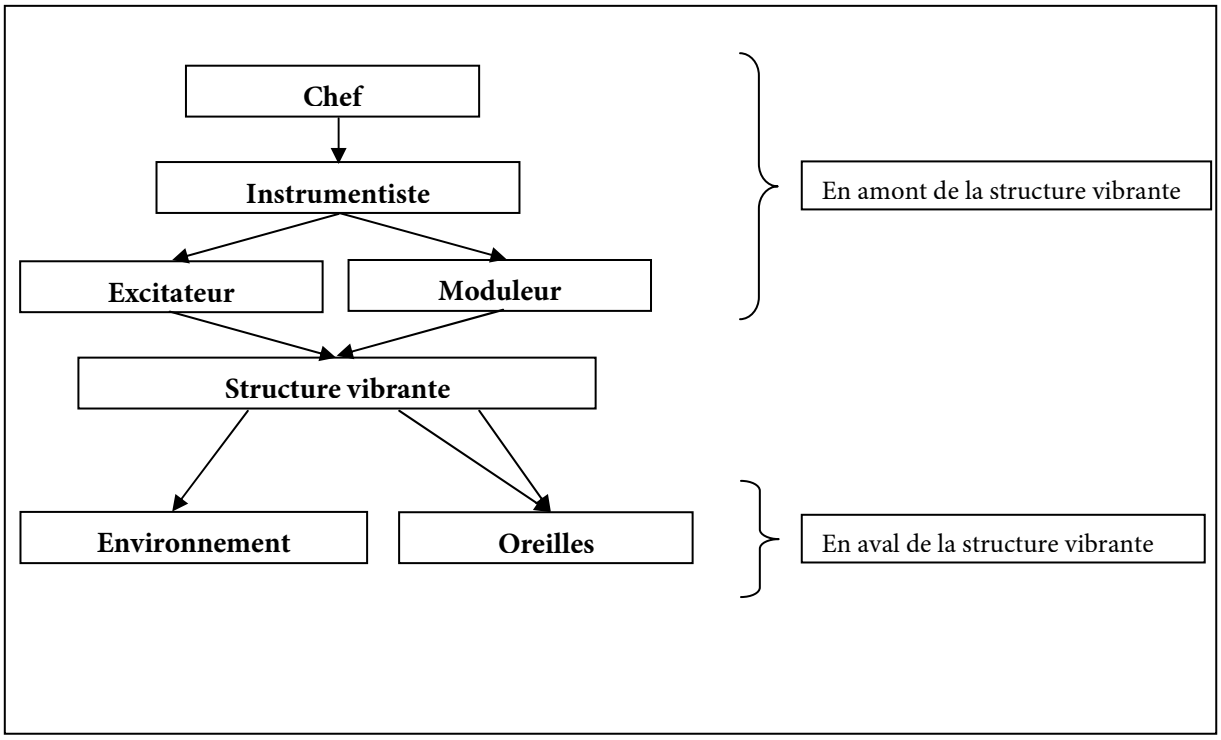


Figure 17 : La hiérarchisation des composants d'un modèle physique dans le « Manuel d'utilisation pour GENESIS »

4.2.2. Une grammaire pour GENESIS ?

La hiérarchisation Brutel souffre, comme nous le verrons (cf. § 4.2.3), d'un manque de généralité certain, qui était connu au moment même de sa formulation. Il faut donc voir dans cette proposition une première étape dans la recherche d'une vision globale de la modélisation avec GENESIS.

Des travaux ont rapidement été menés afin de dépasser ces limitations. C'est ainsi qu'a été initié *l'Atelier Instrumentarium*, série de recherches ciblées menées à l'ACROE qui accroissent rapidement le nombre et la diversité des modèles GENESIS, particulièrement avec des modèles qui, précisément, sortent du cadre strict de la hiérarchisation Brutel et explorent de nouveaux horizons qui devront être pris en considération par une approche systémique plus complète.

Parmi ces études, celle qu'a réalisée Lionel Toussaint visait en particulier à aller plus loin que la hiérarchie du Catalogue Brutel, en adoptant l'outil des grammaires génératives [Pirot&Toussaint 2004]. La grammaire des modèles proposée comporte pourtant des catégories similaires à celles déjà connues :

- Structure vibrante
- Excitateur (catégorie qui englobe les notions d'Excitateur et de Modulateur définies dans le catalogue Brutel)
- Coupleur
- Ecoute
- Structure résonante

- Chevalet
- Générateur d'évènements

La dernière catégorie remplace à la fois le « Chef » et « l'Instrumentiste », respectivement à travers les catégories syntaxiques *Gener_sup* et *Gener* de la grammaire. Ce changement de terminologie constitue une première extension par rapport aux deux notions précédemment utilisées. Il représente un affranchissement partiel vis-à-vis de la référence explicite à la chaîne instrumentale réelle. Cependant, à quelques détails près, la grammaire Toussaint s'apparente plus à une formalisation stricte de la hiérarchie Brutel qu'à une véritable généralisation. Les modèles qu'elle engendre sont finalement à peu près les mêmes que ceux qu'on pouvait construire à partir du Manuel, laissant de côté un grand nombre de modèles réalisables avec GENESIS et pertinents d'un point de vue musical.

Globalement, on peut dire qu'une grammaire formelle des modèles GENESIS est inutile en tant que telle pour les utilisateurs, qui seraient peu nombreux à savoir la lire. Par ailleurs, si on parvenait à la présenter d'une façon accessible par le plus grand nombre, elle risquerait d'avoir un effet « stérilisant » puisqu'elle ne représenterait nécessairement qu'une partie des modèles réalisables. En effet, la seule grammaire qui puisse générer tous les modèles possibles est celle qu'on peut déduire directement des règles de construction CORDIS-ANIMA. Mais c'est précisément parce que celles-ci sont « trop élémentaires » qu'on cherche à construire un langage de plus haut niveau pour la modélisation.

En revanche, comme le propose Toussaint, il est envisageable qu'une grammaire formelle forme la base de fonctions de génération de modèles dans GENESIS, non pas sous une forme explicite, mais à travers des boîtes de dialogue ou des menus permettant de guider la conception d'un modèle. Mais il s'agit là d'un choix concernant le développement de GENESIS lui-même et non les questions qui nous préoccupent dans ces travaux.

4.2.3. Critique des travaux précédents

4.2.3.1 Dépasser la chaîne instrumentale

Grâce aux avancées significatives que nous venons de souligner, le Manuel Brutel constitue une étape décisive dans la constitution d'un « guide de modélisation » pour la création musicale avec CORDIS-ANIMA.

Ce travail est cependant critiquable, principalement en ce qui concerne la hiérarchie proposée. Calquée sur la chaîne instrumentale réelle, elle ne représente qu'une partie des modèles réalisables avec GENESIS. Bien que ce cadre soit opératoire – de nombreux modèles peuvent effectivement être analysés de cette manière – il est trop restrictif. Il nous faut donc développer une organisation plus générale, éventuellement hiérarchique, en sachant par avance qu'un certain nombre d'aspects lui échapperont nécessairement.

4.2.3.2 Composants et fonctions

Les deux propositions précédentes introduisent implicitement une relation bijective entre les éléments de la « chaîne instrumentale » et leur fonction dans le modèle. Il arrive cependant qu'une fonction soit réalisée dans un modèle sans qu'un composant en charge uniquement de celle-ci soit aisément identifiable. Trois exemples simples nous permettent de mettre ce fait en évidence :

- Un module CEL avec une constante de viscosité négative subit une excitation permanente, en l'absence de tout composant excitateur indépendant (il en faut toutefois un pour déclencher l'oscillation). Ici, l'interaction de frottement remplit la fonction d'excitation, mais n'est pas un excitateur dans le sens usuel du terme. Cette technique n'a d'ailleurs pas d'équivalent dans la réalité.

- Dans un modèle où une Corde libre rebondit entre deux modules SOL auxquels elle est liée par des modules BUT, un évènement sonore est produit à chaque rebond. Dans ce cas, il est difficile de dire où se trouvent le générateur d'évènement (« l'Instrumentiste ») et l'excitateur. Pourtant, la génération d'évènements sonores a bien lieu.
- Il est possible de réaliser dans GENESIS un objet qui se rompt en cours de simulation (cf. Chapitre 6, Section 7). Cette rupture correspond à une modification structurelle (un aspect qui n'avait d'ailleurs pas été pris en compte dans les propositions précédentes) qui modifie évidemment les propriétés de l'objet concerné (ou plutôt de qu'il en reste). Or, elle peut survenir de façon autonome, en raison du comportement même de l'objet – par exemple parce que ses oscillations internes ont produit une élongation suffisante en un point de sa structure – là encore sans intervention d'un composant externe. De plus, s'il s'agit d'un objet acoustique, la rupture produit d'un évènement audible, en l'absence d'excitateur.

On voit donc que se concentrer exclusivement sur les composants ne permet pas de rendre compte de tels modèles, qui sont moins marginaux qu'ils peuvent le paraître et apportent des possibilités de création tout à fait pertinentes.

En outre, face à la diversité des composants susceptibles de remplir une seule et même fonction, il paraît indispensable, dans un objectif pédagogique, de présenter à l'apprenant la fonction – et donc de définir comment elle se traduit généralement au niveau phénoménologique du modèle – *avant* de lui montrer les différentes façon de la réaliser.

Plutôt que de catégoriser les composants, comme cela a été fait par Brutel et Toussaint, nous proposons donc :

- d'identifier les fonctions principales réalisables dans un modèle GENESIS.
- d'associer à ces fonctions (par exemple, l'*excitation*), pour illustration, des composants (comme le Percuteur) ou des techniques (comme l'excitation par frottement négatif) permettant de les réaliser.

Dans nos travaux, il n'y aura donc plus d'identification entre les fonctions et les composants. Il s'agit d'un changement de point de vue important, puisqu'il ajoute au *niveau structurel* de l'analyse des modèles, qui prédominait jusqu'ici, un *niveau fonctionnel*, plus général, qui le précède conceptuellement.

4.2.3.3 Les niveaux hiérarchiques

Les travaux de Brutel et Toussaint font apparaître trois niveaux hiérarchiques dans la classification des composants :

- le niveau sonore, qui correspond aux structures vibrantes, coupleurs, résonateurs, etc.
- le niveau des « Instrumentistes » ou « Gener »
- le niveau des « Chefs » ou « Gener_sup »

Le niveau sonore contient des composants dont les fréquences d'oscillation sont audibles (domaine acoustique) tandis que les composants des deux autres niveaux appartiennent au domaine « macro-temporel » (mouvements oscillatoires inaudibles et mouvements non oscillatoires). La séparation entre les niveaux est marquée par l'utilisation d'échelles d'inertie très différentes entre les composants appartenant à chacun d'entre eux. Ainsi, l'Instrumentiste est souvent composé de modules MAS d'inertie au moins 10^6 fois plus grande que ceux de la structure vibrante dont il « joue », et il en est de

même pour la relation entre le Chef et l'Instrumentiste. Les différents niveaux interagissent via des composants spécifiques, comme les excitateurs, qui réalisent en général un transfert d'énergie du niveau supérieur au niveau inférieur.

Ce schéma est généralisable. En effet, il n'existe aucune limite théorique au nombre de niveaux utilisés dans un modèle : on peut très bien imaginer l'utilisation de « super-chefs », de « super-super-chefs » et ainsi de suite, ce qui correspond à une structuration musicale de plus en plus complexe.

Du point de vue physique, la séparation des niveaux se caractérise par le fait qu'un composant d'un niveau donné est affecté de façon négligeable par les composants de niveau inférieur auxquels il est affecté. Ceci étant, il est évident que la nature des phénomènes se déroulant à l'intérieur d'un modèle est la même quelle que soit l'échelle d'inertie considérée. Par exemple un **Serpent*** a exactement les mêmes propriétés qu'une Corde, à l'exception de ses fréquences de vibration qui peuvent être aussi basses que voulu. Il apparaît donc que certaines fonctions réalisées par les composants sont applicables à n'importe quel niveau. Par exemple, on peut tout à fait dire qu'un « Chef » excite un « Instrumentiste » lorsqu'il lui communique de l'énergie.

Il faudra donc, pour toutes les fonctions que nous identifierons, envisager leur application à n'importe quel niveau hiérarchique. Toutefois, il n'est peut-être pas intéressant de généraliser systématiquement, car une fonction issue du niveau sonore peut ne pas faire sens de façon évidente au niveau macro-temporel et vice-versa. Cela n'est pas étonnant, dans la mesure où ce passage mène de la production sonore (et donc de la perception auditive) au geste, voire à la construction musicale, c'est-à-dire des domaines de nature très différente du point de vue de l'action, de la perception et de la cognition.

5. La problématique de l'Instrumentarium musical CORDIS-ANIMA

"I can use the kitchen, but I can't cook."
Antonio Camurri (Séminaire donné à l'ACROE, Grenoble, 2 mars 2007)

La modélisation physique CORDIS-ANIMA présente, comme nous l'avons déjà montré, des concepts intuitifs qui rendent relativement aisée la compréhension de ses principes et de ses modules élémentaires. En revanche, elle est délicate à *pratiquer* dans un premier temps, ce qui s'explique en grande partie par le fait que son approche de « bas niveau » de la modélisation impose à l'utilisateur d'acquérir une certaine expérience avant de commencer à obtenir des résultats pertinents d'un point de vue musical ; on a vu par exemple que les utilisateurs débutants ont tendance à obtenir toujours le même type de sons. CORDIS-ANIMA est un langage élémentaire, qui « ne dit rien » des phénomènes complexes qu'il permet d'engendrer, d'où la nécessité de transmettre aux utilisateurs les connaissances et le savoir-faire indispensables à sa maîtrise.

Ainsi, l'objectif de cette thèse est la conception d'un Instrumentarium pour la création musicale avec CORDIS-ANIMA, travail qui s'intègre au développement d'un environnement didactique pour GENESIS, outil complet d'aide à l'apprentissage et à la création répondant aux difficultés que nous venons de soulever. D'une certaine façon, l'environnement didactique de GENESIS jouera un rôle similaire au *Csound Book* [Boulanger 2000] pour l'environnement Csound : il doit permettre à l'utilisateur de maîtriser le principe de modularité et d'acquérir la capacité de passer d'une idée sonore ou musicale à sa réalisation dans l'environnement.

La « métaphore de la cuisine » est particulièrement appropriée pour illustrer l'objectif de l'environnement didactique : il s'agit de faire passer l'apprenant du stade où il sait utiliser tous les

appareils et ustensiles que contient une cuisine – ce qui ne pose pas de difficulté particulière – au stade où il *sait cuisiner*. Il ne suffit pas pour cela de lui fournir une liste de recettes, car il n'apprendrait alors qu'à les appliquer et ne saurait rien faire d'autre. Il faut lui transmettre les principes les plus fondamentaux de la cuisine, lui permettant ainsi non seulement d'appliquer les recettes, mais aussi d'en inventer de nouvelles…

L'environnement didactique n'est donc *pas* le manuel de GENESIS, ni une simple collection de modèles accompagnés des règles permettant de les paramétrer. En plus de l'Instrumentarium, qui est destiné à en former le cœur, l'environnement didactique doit comporter des documents de natures diverses apportant à l'utilisateur une compréhension profonde de CORDIS-ANIMA et une appréhension complète des possibilités offertes par GENESIS, des différentes approches et techniques de modélisation. L'environnement didactique pourra comporter, entre autres, les éléments suivants :

- une présentation générale des différents approches de la modélisation (phénoménologique, fonctionnelle, structurelle [Cadoz 1990]) et de la composition avec GENESIS ;
- des animations visuelles expliquant les princes physiques et algorithmiques de CORDIS-ANIMA ;
- des exemples sonores réalisés avec GENESIS (qu'il s'agisse de simples sons isolés ou d'extraits plus ou moins longs de pièces musicales abouties) associés aux modèles qui les ont produits ;
- des documents écrits par des utilisateurs expérimentés décrivant leur propre démarche de modélisation et de création avec GENESIS.

L'environnement didactique est envisagé comme un ensemble multimédia de documents, présentant deux caractéristiques fondamentales : d'une part une navigation hypertextuelle entre les documents (dont l'intérêt n'est plus à démontrer) et d'autre part une consultation basée sur différents niveaux de complexité, permettant à l'utilisateur d'aborder les concepts présentés de manière plus ou moins approfondie selon ses compétences et ses centres d'intérêt.

Mais concentrons-nous maintenant sur la notion d'*instrumentarium*, dans un sens général tout d'abord, puis dans le contexte précis de nos travaux.

5.1. La notion d'instrumentarium

Bien qu'absent des dictionnaires de référence en langue française, le terme *instrumentarium* est couramment utilisé pour désigner une collection physique d'instruments de musique, comme l'Instrumentarium des Percussions de Strasbourg[28]. Ces instruments peuvent, comme c'est le cas avec cet exemple, être utilisés dans un contexte de création par un ensemble musical ou au contraire être destinés à l'exposition au public, à la recherche et à la conservation.

Par extension, un instrumentarium peut désigner une collection abstraite d'instruments, par exemple :

- l'ensemble des instruments originaires d'une culture donnée (ex : « l'instrumentarium malgache ») ;
- un ensemble d'instruments créés par une personne ou un groupe connu (ex : « l'instrumentarium Baschet »[29]).

[28] Les Percussions de Strasbourg, 15 place André Maurois, 67200 Strasbourg - http://www.percussionsdestrasbourg.com

[29] Il s'agit d'instruments inventés par François et Bernard Baschet au cours de la deuxième moitié du XXe siècle

Mais revenons à la notion d'instrumentarium en tant que collection physique. Au-delà de la simple exhaustivité, la qualité d'un instrumentarium destiné à l'exposition ou à la recherche provient des informations disponibles à propos de ses instruments : leur histoire (individuelle ou générale), leurs relations et, plus globalement, le contexte dans lequel ils ont été crées et utilisés (culture, pratiques musicales, religion, etc.). Toutes ces connaissances font en réalité *partie intégrante* de l'instrumentarium. Afin de les rendre accessibles et utilisables, il est bien entendu nécessaire de les organiser, ce qui implique en particulier de mettre en place une ou plusieurs classifications des instruments et de comprendre comment ils s'intègrent dans le système musical dont ils sont issus. Comme c'est le cas pour toute classification, il n'existe aucune façon universelle de ranger les instruments de musique : toute typologie est le fruit de choix et de compromis adaptés à des circonstances et à des besoins précis. Par conséquent, un instrumentarium a nécessairement une valeur relative.

Des considérations similaires peuvent être formulées en ce qui concerne les instrumentariums rattachés à un ensemble musical. Bien sûr, ce contexte ne nécessite pas l'établissement de classifications, ni la collecte d'informations détaillées comme précédemment. Cependant, il est clair que les instrumentariums de ce type présentent naturellement une certaine organisation, de part leur intégration à un système musical, qui organise les instruments en familles, leur attribue différents rôles musicaux, privilégie certains modes de jeux, etc. En outre, chaque instrumentiste d'un ensemble musical a sa propre approche de l'instrument qu'il pratique. Celui-ci n'est pas à ses yeux une « boîte noire » produisant des sons, mais un objet façonné, constitué de composants liés d'une certaine manière afin de produire toute une gamme de sons. De plus, cet instrument n'est pas « isolé », il s'intègre dans une histoire et une culture musicales que l'instrumentiste aura eu la possibilité de découvrir lors de son apprentissage musical et de consolider par sa pratique ultérieure.

Ainsi, loin d'être une simple collection d'instruments, un instrumentarium porte en son sein, ne serait-ce que de façon implicite, un *système conceptuel* qui reflète la culture musicale dont il est issu, mais aussi les objectifs et les conceptions de ses auteurs.

5.2. Définition de l'Instrumentarium musical CORDIS-ANIMA

5.2.1. Relation avec les instrumentariums acoustiques

Si nous cherchons à concevoir un instrumentarium pour la création musicale à l'aide des modèles CORDIS-ANIMA (que nous nommerons plus simplement l'*Instrumentarium GENESIS*[30] dans la suite de ce document), c'est à la fois dans une perspective pratique – ces modèles sont effectivement utilisés en situation de création – et dans un objectif de recherche : ayant à notre disposition un système de modélisation physique très général, nous cherchons à en explorer et en maîtriser les possibilités, afin de pouvoir les transmettre.

Il existe deux différences fondamentales entre l'Instrumentarium GENESIS et les instrumentarium acoustiques « traditionnels ». D'une part, ces derniers se basent sur des pratiques et des conceptions

[30] Nos travaux concernent globalement la création musicale à l'aide de CORDIS-ANIMA. Cependant, à un niveau pratique, nous avons uniquement travaillé dans l'environnement GENESIS (que ce soit pour l'analyse ou la création de modèles) et c'est à ce dernier que les applications pratiques de cette thèse sont destinées en priorité, d'où l'emploi de l'expression « Instrumentarium GENESIS ». L'organisation conceptuelle de l'Instrumentarium que nous proposons est valide pour toute mise en œuvre de CORDIS-ANIMA, qu'elle soit en temps réel ou non et quel que soit le nombre de dimensions de l'espace de simulation. Seuls certains des éléments concrets (composants ou techniques de modélisation) que nous présenterons sont spécifiques à GENESIS, dans la mesure où ils sont conçus pour un espace de simulation unidimensionnel.

musicales qui, bien qu'évoluant en permanence, sont solidement établies et font l'objet d'études rigoureuses (dans les domaines de la musicologie, de l'ethnomusicologie et de l'organologie) depuis plus d'un siècle. Par comparaison, les modèles CORDIS-ANIMA sont très récents, de même que les études réalisées à leur sujet. Toutefois, comme le montre l'analyse du corpus de modèles que nous réaliserons dans le Chapitre 5, leur histoire est suffisamment longue pour que des usages se soient mis en place, sans qu'ils soient systématisés – c'est là l'un des enjeux principaux de nos travaux. Par ailleurs, il est clair que les éléments de l'Instrumentarium ne sont pas des « étant donnés », mais des modèles construits de toutes pièces, qui peuvent représenter d'autres objets que des instruments et dont le nombre est potentiellement illimité. En d'autres termes, l'Instrumentarium ne doit pas simplement prendre en considération les propriétés et l'utilisation musicale des modèles, mais également leur fabrication : il doit concilier « lutherie virtuelle » et pratique musicale.

L'Instrumentarium comprendra une librairie structurée de modèles GENESIS, qui est « l'équivalent » de la collection d'instruments des instrumentariums réels. Ces modèles sont les balises permettant le repérage dans l'espace musical de GENESIS et servant de points de départ pour le travail de création musicale. Cependant, la création de la librairie de modèle est presque secondaire par rapport au développement des aspects conceptuels selon l'approche systémique, qui constitue une étape préalable. La structuration de cette librairie selon une classification précise découlera en effet de l'établissement d'une base conceptuelle solide et ne peut en aucun cas le précéder.

L'Instrumentarium est donc loin d'être un simple catalogue de modèles ou de composants.

5.2.2. L'Instrumentarium en tant que système conceptuel

> *« On ne devrait pas se contenter de construire des modèles et de les donner aux musiciens. Il est nécessaire […] d'en concevoir des abstractions et de proposer des explications utiles aux utilisateurs »*
> [Rodet&al. 1995].

La proposition d'une *organisation générale des modèles musicaux CORDIS-ANIMA* est le fondement de l'Instrumentarium. Précisons immédiatement que l'on parle ici de l'organisation *interne* des modèles, c'est-à-dire des relations entre les composants ou les phénomènes qu'on peut y trouver, et non d'une organisation des modèles *les uns par rapport aux autres.* La spécificité de notre recherche par rapport au domaine de l'organologie, pour autant qu'on puisse établir une telle comparaison, réside précisément dans le fait que les différents éléments (au sens le plus large du terme) d'un modèle, sont au cœur même de notre attention au lieu d'être avant tout considérés comme des critères permettant de différencier les « instruments » les uns des autres.

Mais pour étudier les modèles, il faut pouvoir en parler de façon univoque. Or, l'une des premières difficultés rencontrées lors de l'analyse de la modélisation avec GENESIS est justement celle du langage. Un vocabulaire a spontanément été mis en place, au cours de plus d'une dizaine d'années de pratique, pour décrire les objets ou les phénomènes que l'utilisateur rencontre dans l'environnement. Mais nombre des termes ou des expressions qui le composent manquent de précision, car ils sont tirés du langage courant, avec toute l'ambiguïté que cela implique. Ainsi, des termes comme « structure », « élément » ou « composant » sont utilisés très fréquemment, mais avec des significations variables. *A contrario*, les mots manquent parfois pour décrire certains aspects des modèles ou certains phénomènes, ce qui oblige à employer de longues périphrases. Notre première tâche consiste donc à stabiliser le vocabulaire existant, en le débarrassant de ses ambiguïtés ou de ses redondances, et de proposer de nouveaux termes pour pallier les manques observés. Le Chapitre 5 sera presque entièrement consacré à ce travail.

Une fois le vocabulaire élémentaire défini, il est possible de commencer l'élaboration du système conceptuel que constitue l'organisation générale des modèles. Celui-ci fera appel à des catégories de « haut-niveau ». Nous connaissons déjà deux d'entre elles : les fonctions et les composants. Il nous faudra dans un premier temps déterminer si elles sont suffisantes, ou si d'autres doivent être prises en compte. Nous pourrons alors formaliser ce système conceptuel à partir des instances de ces catégories, c'est-à-dire identifier les différents types de fonctions, de composants, etc., et déterminer leurs relations. Nous aboutirons ainsi à un schéma général similaire, dans l'esprit, à la hiérarchisation Brutel, mais qui s'en distinguera, comme nous l'avons déjà mentionné, par l'abandon de la notion de composant en tant que catégorie principale et par une prise en compte aussi générale que possible des possibilités de modélisation de GENESIS. Ceci implique d'ores et déjà que les différentes catégories de fonctions et de composants que nous identifierons seront moins spécifiques que pour les propositions précédentes, et que la notion de structure vibrante ne sera plus considérée comme centrale.

A un niveau moins abstrait, l'aspect conceptuel de l'Instrumentarium inclut également les techniques les plus générales de structuration des modèles, principalement en ce qui concerne la composition de fonctions, la génération d'évènements et les rapports entre les échelles de grandeurs physiques des composants – points essentiels de toute pratique un tant soit peu avancée de la modélisation avec GENESIS, qui seront abordés dans le Chapitre 7.

5.2.3. L'instrumentarium en tant que composant de l'environnement didactique

Dans la cadre de l'environnement didactique de GENESIS, l'Instrumentarium se concrétise par des éléments de diverses natures, qui seront rendus disponibles avec les prochaines versions du logiciel.

En premier lieu, il comprendra un ensemble de documents qui exposeront les aspects conceptuels que nous venons d'évoquer. Suivant la « philosophie » de l'environnement didactique, qui est de proposer plusieurs niveaux de détail adaptés à différentes catégories d'utilisateurs, le système conceptuel pourra être présenté de façon détaillée (sous forme d'une transcription relativement directe des résultats de cette thèse) ou plus synthétique.

Par ailleurs, l'Instrumentarium sera également composé d'un ensemble de *fiches de description* abordant de façon détaillée les aspects pratiques de la modélisation : modules élémentaires, techniques de modélisation et composants courants, particularités du système de simulation telles que l'effet Thil, etc. De façon générale, cette deuxième partie de l'Instrumentarium présentera à l'utilisateur une sélection des résultats issus des axes de recherche « approches analytiques » et « développement de modèles ». Pour reprendre notre métaphore, là où la première partie introduisait les principes généraux de la « cuisine », celle-ci est consacrée aux « micro-recettes » les plus courantes et les plus utiles. Elle sera accompagnée d'un ensemble de *formulaires dynamiques* permettant d'effectuer rapidement des calculs fréquemment utilisés lors de la modélisation, comme celui de la vitesse de deux modules MAS après une collision, où celui de la raideur nécessaire pour qu'un module BUT ne soit pas soumis à l'effet Thil.[31]

Le troisième élément principal de l'Instrumentarium est la librairie de modèles que nous avons déjà évoquée. Elle sera structurée en fonction de l'organisation conceptuelle des modèles que nous aurons définie au préalable, mais aussi en fonction des résultats de notre étude des classifications des

[31] A l'heure actuelle, ces formulaires sont disponibles sous forme de fichiers au format Microsoft Excel, mais plusieurs autres façons de les intégrer directement à l'environnement GENESIS sont envisageables, par exemple à travers le langage textuel de création de modèles.

instruments de musique (Chapitre 2). Cette librairie devra bien évidemment couvrir un domaine aussi large que possible aussi bien au niveau acoustique que macro-temporel. Il serait souhaitable, en particulier, qu'elle présente toute une palette d'objets macro-temporels correspondant à différentes approches de la composition structurelles, allant de la plus déterministe à la plus stochastique en passant par la production de structures « naturelles » (la bille qui rebondit en est un exemple typique). Cette diversité permettra au compositeur d'aborder la création avec GENESIS par l'angle correspondant le mieux à ses pratiques et à ses attentes personnelles.

Enfin, l'Instrumentarium comportera un Glossaire (beaucoup plus étendu que celui présent dans cette thèse), composant indispensable étant donné la quantité de termes que comporte le vocabulaire de la modélisation musicale avec CORDIS-ANIMA.

5.2.4. Relation avec les « instrumentariums numériques »

On peut définir la notion d'instrumentarium pour les environnements informatiques de création musicale. La plupart d'entre eux permettent de créer, d'éditer et de mémoriser des *configurations*, c'est-à-dire des ensembles de paramètres qualitatifs (par exemple : la structure d'un patch Pure Data) et quantitatifs (comme une forme d'onde ou la fréquence de coupure d'un filtre passe-bas) qui définissent chacune la totalité d'un processus algorithmique de génération situé au niveau sonore et/ou structurel. La notion de configuration englobe différents termes employés selon les environnements : *son*, *patch*, *preset*, *instrument*, *programme*, *modèle*, etc. Les processus désignés par ces termes peuvent être de nature très différente : par exemple, un modèle GENESIS n'a conceptuellement aucun rapport avec un patch Max/MSP. Il faut donc prendre ici le terme *instrumentarium* avec encore plus de recul que dans le cas de CORDIS-ANIMA : tandis que certaines configurations GENESIS peuvent effectivement représenter un instrument de musique virtuel, ce n'est évidemment pas le cas, par exemple, pour les configurations d'un environnement de CAO.

L'immense majorité des environnements d'informatique musicale sont distribués avec une librairie de configurations qui servent d'exemples pour l'apprentissage et de points de départ possible pour le processus de création. Ces librairies sont généralement structurées hiérarchiquement, de façon à rendre leur utilisation plus aisée : on en revient alors à la notion d'instrumentarium. Par exemple, pour les environnements commerciaux de synthèse sonore, l'organisation des configurations est souvent inspirée de la norme General MIDI, qui répartit les sons instrumentaux en 16 familles (Tableau 1). Dans tous les cas, la structuration des configurations est le résultat d'une classification, qui reflète, comme pour les instrumentariums acoustiques et pour l'Instrumentarium GENESIS, un certain système conceptuel sous-jacent, qu'il soit formulé de façon explicite ou non.

Tableau 1 : Liste des familles d'instruments GM1 (Instrument Patch Map).

1. Piano	9. Reed
2. Chromatic Percussion	10. Pipe
3. Organ	11. Synth Lead
4. Guitar	12. Synth Pad
5. Bass	13. Synth Effects
6. Strings	14. Ethnic
7. Ensemble	15. Percussive
8. Brass	16. Sound Effects

Il est possible de distinguer différents types d'environnements informatiques de création musicale et d'examiner comment leurs instrumentariums sont bâtis. On peut d'une part distinguer les environnements *modulaires* des environnements *non modulaires*. Pour les premiers (parmi lesquels figure GENESIS), la conception d'un instrumentarium s'avère généralement très difficile en raison de l'extrême diversité des configurations réalisables à l'aide des modules élémentaires (dont le nombre dépasse parfois plusieurs centaines). D'autre part, on peut séparer les environnements basés sur une *approche « signal »* des environnements basés sur la *modélisation physique*. Enfin, comme nous l'avons déjà signalé, il existe un continuum d'environnements entre ceux dédiés à la *composition sonore* et ceux traitant de la *composition structurelle*.

Cette classification, bien qu'extrêmement simple, suffit à montrer, si besoin en était, la diversité des environnements informatiques de création musicale et par conséquent, la diversité des « instrumentariums numériques ». Nous n'allons pas nous atteler à la tache relativement colossale d'examiner chacun d'entre eux, mais simplement formuler quelques remarques d'ordre général afin de situer GENESIS et son Instrumentarium dans ce « paysage » et d'en tirer les conclusions qui s'imposent.

Par rapport aux trois critères que nous venons de définir, la situation de GENESIS est la suivante : il s'agit d'un environnement *modulaire*, basé sur la modélisation physique, et qui couvre, à sa manière, l'ensemble du continuum de la création musicale, de la composition sonore à la composition structurelle. Il est actuellement le seul environnement de ce type : dès lors son instrumentarium ne peut qu'être d'une nature différente de celle des autres instrumentariums numériques. Il est donc peu probable qu'une étude poussée de ceux-ci soit d'une grande aide pour nos travaux. Examinons cette affirmation en détails.

Les environnements basés sur une approche signal sont beaucoup plus nombreux que ceux basés sur la modélisation physique. De façon générale, leurs instrumentariums s'appuient sur des bases beaucoup plus répandues dans le domaine de la création musicale à l'aide les nouvelles technologies que celles de la modélisation physique. Il existe au moins deux raisons à ce « déséquilibre ». La première est évidente : l'approche signal est, à l'échelle de l'histoire de l'informatique musicale, beaucoup plus ancienne que la modélisation physique (qui n'a commencé à être popularisée réellement qu'au cours des années 90, notamment avec la commercialisation de synthétiseurs comme le Yamaha VL1). Ses concepts ont donc eu largement le temps de se diffuser et d'innombrables outils basés sur ceux-ci (qu'ils soient « académiques » ou « grand-public », gratuits ou commerciaux) sont disponibles. Ce n'est pas le cas pour la modélisation physique, dont les applications grand-public peuvent quasiment se compter sur les doigts des deux mains. La deuxième raison est plus profonde. Même si les techniques de synthèse et de traitement du son par l'approche signal sont très diversifiées, elles sont toutes basées sur les mêmes concepts, le signal lui-même et la théorie qui l'entoure. Il est par conséquent facile de les connecter entre elles (par exemple, l'application d'un filtre en sortie d'une générateur par synthèse FM ne pose aucun problème pratique). Au contraire, les différentes techniques de modélisation physique ne présentent pas cette homogénéité : elles ne partagent pas du tout les mêmes concepts, même s'il est possible, comme nous l'avons déjà dit, de les hybrider.

Ainsi, l'approche signal présente actuellement un profil beaucoup plus unifié que l'approche par modélisation physique, à tel point qu'on peut parler d'une « culture signal », reposant sur un certain nombre de piliers historiques, comme la norme General MIDI, le triptyque VCO-VCF-VCA hérité des instruments analogiques, ou encore certains appareils (par exemple les synthétiseurs Moog, Roland TB-303 et autres TR-909) devenus « mythiques » et que nombre d'environnement de synthèse

permettent d'imiter.[32] Cette culture est à la base de la majorité des instrumentariums des environnements basés sur une approche signal, y compris pour un environnement modulaire comme Pure Data.[33] A la limite, on peut même dire qu'il existe un « instrumentarium signal » global, partagé à des degrés divers par les différents environnements. Il s'est formé spontanément et évolue en même temps que les techniques de synthèse et de traitement du son et les styles musicaux qui y sont liés. Il comporte en particulier des catégories de sons de synthèse caractéristiques (comme les « Fat Bass » ou les sons « Acid »), qu'on retrouve dans de nombreux synthétiseurs matériels ou logiciels.

La singularité de GENESIS dans ce paysage ne nous incite pas à tenter d'y rattacher son Instrumentarium. Il clair que cette démarche n'aboutirait qu'à une prise en compte très restreinte des possibilités de l'environnement, qui n'a pas vocation à reproduire des instruments ou des sons connus.

Les instrumentariums qui pourraient nous servir de référence sont ceux des autres environnements dédiés à la modélisation physique. Mais ces derniers sont peu nombreux et, pour la plupart, spécialisés dans la reproduction d'un nombre limité d'instruments acoustiques réels, comme le piano pour Pianoteq, ou la trompette, le trombone et le saxophone pour Brass. Seuls Modalys (IRCAM) et Tassman (Applied Acoustics Systems) sont, comme GENESIS, modulaires, mais ils ont tous deux des approches complètement différentes de celle de CORDIS-ANIMA et ne permettent pas d'aborder la composition structurelle. Modalys est un environnement de synthèse modale proposant une modularité à « gros grains » : les objets élémentaires, qui correspondent à des structures vibrantes (cordes, plaques, tuyaux, plectres, etc.), sont plus complexes que ceux de GENESIS et leurs interactions sont prédéfinies. Il n'y a donc aucune correspondance possible entre leurs instrumentariums, mis à part le fait de modéliser avec GENESIS le même type de structures vibrantes. Tassman, quant à lui, est un synthétiseur temps réel, dont on peut jouer grâce au protocole MIDI ou qu'on peut intégrer sous forme de plug-in dans un logiciel hôte. Ses modules élémentaires ne correspondent pas tous à des objets physiques simulés, puisqu'ils comprennent également des effets, des générateurs d'enveloppe et de formes d'ondes ou des filtres. Ses modules physiques, qui sont clairement « plongés » dans un environnement signal, correspondent à des structures vibrantes ou des instruments prédéfinis, par exemple : « String », « Bowed String », « Bowed Marimba », « Plate ». Cette approche est moins modulaire que celle de Modalys, puisque certains de ces modules incorporent directement un mécanisme d'excitation et une structure vibrante. Excitateurs, structures vibrantes, et résonateurs ne sont pas systématiquement séparés et sont parfois présentés dans des catégories pour le moins étonnantes : ainsi, le module « String » (corde) apparaît dans la catégorie « Resonators » (résonateurs), tandis que le module « Plectrum » (plectre) figure dans la catégorie « Generators » (générateurs), aux côtés du module « Noise » qui génère un bruit blanc. Il est évident que cette base manque de cohérence et ne peut absolument pas servir de référence pour nos travaux.[34]

Cette très rapide comparaison avec les instrumentariums des environnements informatiques de création musicale aboutit à une conclusion très claire : le développement de l'Instrumentarium

---

[32] Par exemple, le Chapitre 10 du *Csound Book* donne plusieurs « recettes » permettant d'imiter le son typique des filtres des synthétiseurs analogiques [Mikelson 2000].

[33] En effet, les patches fournis avec Pure Data font largement référence à des techniques de synthèse et de traitement du son populaires.

[34] Par ailleurs, Tassman propose deux catégories de configurations, appelées Instruments (ensembles de modules connectés) et Performances (Instruments préréglés et agrémentés d'un écho et d'une réverbération produisant des sons riches, jouables directement). Ces configurations sont classifiées selon les catégories typiques de « l'instrumentarium signal global », similaires aux familles de la norme General MIDI. Cela confirme que nous avons peu de choses à apprendre de cet environnement pour nos propres travaux.

GENESIS devra être effectué de façon presque totalement autonome, pour la simple et bonne raison qu'aucun autre environnement n'est suffisamment proche des concepts de CORDIS-ANIMA et de GENESIS pour que des enseignements puissent être tiré de la structuration de sa librairie de configuration. Les seules références – relativement partielles, comme nous le verrons – dont nous disposerons pour réaliser ce travail sont les diverses classifications des instruments de musique que nous aborderons dans le chapitre suivant.

5.3. Objectifs et méthodologie de nos travaux

Cette thèse porte essentiellement sur l'Instrumentarium en tant que *système conceptuel* : l'objectif principal de nos travaux est la proposition d'une organisation générale des modèles, telle que nous l'avons décrite précédemment. Nous avons également abordé certains aspects concrets de l'Instrumentarium, mais seulement de façon exploratoire. Un travail de développement conséquent, qui n'entrait pas dans nos objectifs, est en effet nécessaire pour réaliser l'intégration de l'Instrumentarium à l'environnement didactique de GENESIS.

La réalisation de l'Instrumentarium est une démarche d'*analyse* et de *synthèse*. Analyse, car elle s'appuie sur l'étude d'un large corpus de modèles (que nous réaliserons au Chapitre 5), passé au crible afin d'en identifier les traits caractéristiques, les *leitmotivs* ou au contraire les singularités pouvant se révéler pertinentes pour la création musicale. Synthèse, car elle doit faire le lien entre les résultats des approches analytiques et les connaissances empiriques – dont le champ est beaucoup plus vaste – acquises au cours d'une dizaine d'année de pratique de l'environnement.[35]

Un « langage objectif » semble émerger des travaux de création réalisés avec GENESIS : en observant les milliers de modèles produits, il apparaît très clairement que des schémas d'organisation, sans doute largement « dictés » par la nature physique des éléments manipulés, apparaissent de façon récurrente. C'est ce langage que nous tenterons d'expliciter au cours de nos travaux, afin d'aboutir à une vision globale cohérente qui respecte la liberté de l'utilisateur.

Le système conceptuel que nous proposerons ne devra pas constituer une vision partielle et biaisée du potentiel du système CORDIS-ANIMA : l'Instrumentarium de doit pas figer les possibilités de modélisation en les définissant une fois pour toutes. De plus, il devra prendre en compte non seulement les modèles « classiques » que décrivent la hiérarchie Brutel et la grammaire Toussaint, mais aussi les modèles les plus éloignés de la chaine instrumentale traditionnelle. Afin de respecter ces contraintes, plusieurs lignes de conduite seront observées pour la réalisation de nos travaux :

- Garder en permanence à l'esprit le principe de la modularité, qui devra s'appliquer au système conceptuel proposé comme il s'applique au niveau des modules élémentaires.
- Rester proche des phénomènes concrets, du niveau physique ou phénoménologique, afin d'éviter de se substituer à l'utilisateur final.
- Confronter nos propositions avec la réalité des modèles. On pourra considérer que notre système conceptuel est valide s'il permet d'analyser clairement, avec un minimum d'ambiguïtés, le plus grand nombre de modèles possibles.

Nous ne voulons pas imposer au musicien utilisant GENESIS une organisation déjà finalisée des modèles et des processus de création, risque que nous prendrions sans doute si nous définissions une grammaire formelle des modèles GENESIS. Nous souhaitons au contraire lui donner les outils

[35] Ces connaissances donneront par ailleurs lieu à des développements analytiques permettant de maîtriser les techniques de modélisation correspondantes avec plus d'efficacité.

essentiels pour lui permettre de créer son propre système de création musicale en fonction de ses besoins et de ses objectifs. En quelque sorte, nous ne chercherons pas à définir une grammaire définitive, mais plutôt une « méta-grammaire » resserrée autour d'un nombre minimal de types de fonctions, de composants (ou d'autres catégories conceptuelles) identifiés lors de l'analyse du corpus de modèle que nous aurons effectuée.

Remarque

En raison du sujet de cette thèse, nous serons amenés à évoquer dans ce document une très grande variété de composants, de techniques ou de phénomènes différents. Dans ce contexte, il nous est impossible de donner pour chacun d'entre eux une description détaillée, incluant, en particulier, des résultats analytiques. Le faire serait équivalent non seulement à concevoir l'Instrumentarium, mais également à le réaliser presque entièrement, ce qui n'est l'objectif de nos travaux. Nous nous en tiendrons donc la plupart du temps à une description phénoménologique et qualitative des éléments abordés, c'est-à-dire à un niveau suffisant pour développer clairement notre propos sans le « noyer » dans des considérations techniques superflues, sachant que les analyses mathématiques sous-jacentes ont pour la plupart déjà été réalisées (principalement pour les structures linéaires).

Chapitre 2. Les classifications des instruments de musique

La notion d'instrumentarium étant étroitement liée à celle de *classification des instruments de musique*, il nous est apparu qu'une étude des classifications réalisées à différentes époques et dans différentes cultures nous offrirait un point de comparaison pertinent pour le développement de l'Instrumentarium GENESIS, dans l'objectif de l'établissement d'une librairie de modèles. Il est clair que cette étude ne couvre pas l'ensemble du domaine des modèles CORDIS-ANIMA : en effet, ceux-ci ne correspondent pas nécessairement à des « instruments virtuels », puisqu'ils peuvent comporter des composants situés à l'échelle macro-temporelle. De plus, le développement d'une organisation générale des modèles GENESIS est, comme nous l'avons déjà dit, une étape qui précède nécessairement la classification des modèles afin d'en proposer une librairie. Ainsi, l'examen rapide des différentes classifications que nous réaliserons dans ce chapitre n'a pas pour objectif direct de servir de base à l'élaboration conceptuelle de l'Instrumentarium ; il doit surtout permettre de préparer sa réalisation concrète ultérieure.

Nous nous concentrerons sur deux aspects précis : les *critères de classification* utilisés et la *méthodologie* adoptée pour réaliser les classifications (ce deuxième point étant uniquement pertinent pour les classifications établies à des fins de recherche à partir du XIXe siècle). Dans les deux cas, nous tenterons de déterminer quels sont les apports possibles pour nos propres travaux.

Nous aborderons tout d'abord les classifications des instruments acoustiques, puis celles des « instruments électroniques », ce qui sera pour nous l'occasion de discuter le sens et la pertinence de cette expression couramment employée malgré sa signification pour le moins imprécise.

Nous distinguerons deux types principaux de classifications :

- Les classifications *vernaculaires*, développées dans une culture particulier et prenant en compte uniquement les instruments connus au sein de celle-ci. Ces classifications ont souvent été établies « dans la pratique », répondant en partie au besoin naturel de ranger les objets en différentes catégories pour leur usage, mais elles peuvent également revêtir une signification symbolique dépassant largement cet aspect purement pragmatique. La classification vernaculaire la plus proche de nous est la répartition des instruments occidentaux classiques en trois familles : les instruments à vent (eux-mêmes divisés en « Bois » et en « Cuivres »), les instruments à cordes et les percussions. Notons que les classifications vernaculaires, pour la plupart relativement anciennes (certaines remontent même à plus de 4000 ans), ne concernent évidemment que les instruments acoustiques.
- Les classifications *systématiques*, établies par des conservateurs de collections d'instruments ou des chercheurs (organologues, ethnomusicologues), dont l'objectif est d'intégrer dans un système formel la totalité des instruments existant ou ayant existé. Leurs auteurs s'abstraient généralement de leur culture d'origine de manière à proposer une classification aussi universelle que possible. Ces classifications ont, comme nous le verrons, progressivement intégré les « instruments électroniques ».

La majorité des classifications sont basées sur une hiérarchie à plusieurs niveaux pouvant être représentées sous la forme d'un arbre. L'ensemble des instruments considérés est alors divisé en plusieurs catégories, elles-mêmes composées de plusieurs sous-catégories, et ainsi de suite. On peut caractériser ce type de classifications par l'homogénéité des critères de différenciation utilisés à chaque

niveau : il peut y en avoir un seul, pour les classifications les plus rigoureuses, ou plusieurs. Les critères utilisés à un niveau donné sont souvent différents d'une branche à l'autre de l'arbre.

Remarque
La source principale des informations précises sur les différentes classifications des instruments acoustiques présentées dans ce chapitre est l'excellent ouvrage de Margaret J. Kartomi [Kartomi 1990]. Nous ne citerons nos autres références que lorsque cela sera nécessaire.

1. Les classifications vernaculaires

Les classifications vernaculaires sont innombrables : chaque culture que la Terre ait portée à ce jour en a probablement produit au moins une. Il est bien entendu hors du propos de ce document de tendre vers une quelconque exhaustivité : nous nous contenterons d'en aborder trois parmi les plus connues qui présentent une importante diversité de critères de classification et ont eu, pour certaines, une influence sur les classifications systématiques actuelles. D'autres classifications auraient pu être abordées ici, en particulier celles utilisées à Java et au Tibet.

1.1. Classifications chinoises

Le principe fondamental de classification des instruments de musique en Chine est la division selon le matériau principal utilisé pour la fabrication de l'instrument. Utilisé depuis plus de 4000 ans, ce paradigme a donné le jour à de nombreuses classifications différant principalement par le nombre et le rang des matériaux pris en compte.

Les tous premiers documents témoignent d'une division en quatre matériaux (pierre, peau, soie, bambou) qui est progressivement remplacée par un schéma à huit matériaux, nommé *pa yin* (cf. Tableau 2). Selon les époques, ceux-ci seront présentés selon un rang différent en fonction de leur valeur marchande et symbolique du moment (la pierre et le métal étant très souvent considérés comme les plus prestigieux).

Tableau 2 : Liste des huit matériaux composant les instruments des classifications chinoises

Métal	Pierre	Peau/Cuir	Calebasse
Bambou	Bois	Soie[36]	Terre/Argile

Le timbre des instruments, bien qu'en partie déterminé par le matériau dans lequel ils sont construits, ne semble pas avoir joué de rôle explicite dans la naissance de ce principe de classification. Celui-ci s'inscrit dans un cadre plus large, lié à la philosophie et aux croyances chinoises. En effet, et bien que cet aspect ait perdu de son importance au cours des siècles, chaque matériau était à l'origine associé à différents éléments étrangers à la musique : les directions cardinales, les vents, les saisons, etc. Les instruments de musique, auxquels des propriétés magiques étaient attribuées, étaient alors mis en œuvre dans un certain nombre de rituels permettant à l'homme de connaître ou d'influencer le monde l'entourant ; ils devaient ainsi permettre de favoriser les récoltes en manipulant la direction des vents, ou de deviner les intentions d'un ennemi.

Par la suite, la classification en huit matériaux fût enrichie d'éléments de façon à refléter le rôle des

[36] La soie est utilisée pour la fabrication de cordes.

instruments correspondants dans la pratique musicale. Ainsi, le musicologue Chu Tsai-Yü (1536-1611) regroupe certains matériaux selon les techniques de jeu ou la fonction musicale des instruments correspondants [Kartomi 1990, p. 44]. Plus opératoires que la simple division en huit matériaux, ces classifications manquent de cohérence par le fait qu'elles mélangent deux critères de classification différents au même niveau (la technique de jeu et la fonction musicale). Par ailleurs les deux classifications, qui ont été établies dans des travaux séparés, semblent contradictoires puisque les matériaux utilisés dans la catégorie « instruments rythmiques » ne sont pas les mêmes de l'une à l'autre.

Tableau 3 : Deux classifications des matériaux composant les instruments de musique par Chu Tsai-Yü, selon les techniques de jeu et la fonction musicale

Technique de jeu	Matériaux
Instruments actionnés par la force musculaire	Métal, Pierre, Soie
Instruments actionnés par le souffle	Bambou, Terre/Argile, Calebasse
Instruments rythmiques	Peau/Cuir, Bois

Fonction musicale	Matériaux
Instruments utilisés pour l'accompagnement	Soie
Instruments actionnés par le souffle	Bambou, Terre/Argile, Calebasse
Instruments rythmiques	Métal, Pierre, Peau/Cuir, Bois

D'autres auteurs ont regroupé les instruments en fonction du type de musique pour lesquels ils sont utilisés, par exemple : musique cérémonielle, musique populaire, musique étrangère.

Au contact d'autres civilisations, les chinois ont découvert et utilisé des instruments fabriqués dans d'autres matériaux que ceux considérés auparavant. Leur classification étant problématique, Ma Tuan-Lin a introduit une neuvième catégorie permettant d'inclure des instruments faits de coquillage ou d'ossements.

1.2. Classifications indiennes

L'Inde a vu se développer de nombreuses civilisations et cultures au fil des siècles. Ces civilisations peuvent être désignées par le nom de leur religion centrale. L'Hindouisme, le Jainisme et le Bouddhisme sont les plus connues. Chacune d'entre elle a produit une ou plusieurs classifications des instruments de musique, en raison de la place particulièrement importante de la musique dans la religion et donc dans la société. Parmi ces classifications, qui partagent un socle commun évident, la classification hindoue « classique » est la plus précise et la mieux connue de toutes. C'est donc la seule que nous aborderons ici, choix qui se justifie également par le fait qu'elle présente une ressemblance frappante, au premier niveau de division, avec certaines classifications modernes.

Cette classification est exposée en détail dans le *Nātyaśāstra*, traité sanscrit datant d'entre le IIe siècle av. J.C et le VIe siècle après J.C. Les instruments y sont divisés selon trois niveaux :

- Le premier niveau correspond aux caractéristiques physiques ou morphologiques essentielles des instruments. Il comprend quatre catégories :
    - Les instruments « étirés »
    - Les instruments « couverts »
    - Les instruments « solides »
    - Les instruments « creux »

  Bien que ces termes soient d'une précision relative (en particulier, les deux premières catégories ne sont pas, en toute logique, mutuellement exclusives, puisque un instrument peut être « couvert » d'une membrane « étirée »), il est facile de reconnaître que la première catégorie va contenir des instruments à cordes, la deuxième des instruments à membrane comme les tambours, la troisième des instruments non susceptible de tension comme les cloches, et la dernière des instruments à vent.
- Au deuxième niveau, chaque catégorie principale est divisée en deux sous-catégories selon la fonction musicale de l'instrument : le jeu en solo ou l'accompagnement. Les instruments ayant le premier rôle sont considérés comme des « branches majeurs » et les autres comme des « branches mineurs ».
- Enfin, le troisième niveau établit une distinction entre les instruments selon des caractéristiques morphologiques précises, variables selon la catégorie.

Il est particulièrement intéressant de noter que les critères de classification retenus ne sont pas influencés par la signification religieuse des instruments, qui est pourtant forte dans l'hindouisme : il s'agit donc d'une approche radicalement différente de celle adoptée par les Chinois. Les critères choisis sont pragmatiques : ils sont liés soit aux caractéristiques physiques et morphologiques des instruments, soit à leur rôle musical. A travers les termes « étirés », « couverts », « solides » et « creux », qui concernent l'aspect immédiatement visible de l'instrument, c'est indirectement la *nature du mécanisme de production sonore* qui est catégorisé, principe qui a traversé les siècles et garde encore aujourd'hui toute sa pertinence : ce schéma a d'ailleurs inspiré la première classification systématique occidentale, celle de Mahillon que nous évoquerons ci-dessous [Jairazbhoy 1990]. On remarque en revanche que la technique de jeu n'est pas prise en compte par ce système ; elle l'est dans d'autres classifications hindoues, qui évoquent par exemple les instruments « pincés avec les ongles ».

1.3. Classifications grecques

Les grecs mettaient la voix au dessus de tous les instruments. Elle était considérée comme le seul instrument « doté d'une âme ». Par ailleurs, ils négligeaient presque totalement les percussions, n'accordant une place d'honneur qu'aux instruments à corde (typiquement, la lyre) et à vent, les seconds étant eux-mêmes considérés comme inférieurs aux premiers. Cette hiérarchie trouve son explication dans les conceptions cosmologiques, les vents renvoyant à un domaine du cosmos moins parfait, moins ordonné, que celui, totalement harmonieux évoqué par les cordes. De plus, les cordes étaient abondamment utilisées dans le développement de théories sonores et musicales car, contrairement aux instruments à vent, elles sont aisément manipulables (il est par exemple très facile de couper une corde en deux ou en trois et de vérifier les effets de cette opération). Les instruments à

cordes, associés au dieu Apollon, reflétaient donc une pureté et une harmonie qui les rendaient nettement supérieurs aux instruments à vent, par ailleurs utilisés dans des circonstances sociales moins pieuses (association avec le dieu Dionysos).

Plus tard, les instruments à percussion seront néanmoins pris en compte par certains auteurs de traités musicaux. Porphyry élabore ainsi une classification en trois catégories principales (cordes, instruments dans lesquels on souffle, instruments frappés) qui aura une influence durable jusqu'à la fin de l'époque médiévale en Europe comme dans les pays Arabes. On remarque que deux critères de nature différente sont mélangés dans cette classification, puisque la première catégorie regroupe les instruments en fonction de la nature de leur structure vibrante (les cordes) tandis que les deux dernières les regroupent en fonction du mode de jeu (le souffle ou la percussion).

Un autre auteur, Pollux, propose une classification comportant seulement deux catégories principales : les « percussions » et les vents. Le mot percussion est ici employé dans un sens très particulier puisqu'il désigne toute action manuelle permettant d'exciter l'instrument, comme le pincement ou la frappe. Ainsi, ces « percussions » comprennent aussi bien les instruments à corde que les instruments à percussion proprement dits. On peut rapprocher cette conception de la classification à deux catégories principales établie par Schaeffner (voir Section 3.2.4) près de deux mille ans plus tard, en identifiant les « percussions » de Pollux avec les « instruments à corps solide vibrant ».

Enfin, notons que certains auteurs (en particulier Aristides) attribuaient aux instruments un genre sexuel : ils pouvaient être masculins, relativement masculins, relativement féminins ou féminins. Cette classification devait rendre compte du fait que les instruments autres que la voix ont des effets émotionnels, bien qu'ils soient inanimés.

On voit donc que les critères de classification utilisés par les Grecs sont variés, allant d'aspects subjectifs comme le genre sexuel à des aspects concrets comme la nature de la structure vibrante (corde) et le mode d'excitation (percussion, souffle).

2. Les classifications systématiques des instruments acoustiques

A la fin du XIXe siècle, aux travers d'échanges de plus en plus nombreux entre les cultures du monde entier, les collections européennes s'enrichissent d'un nombre considérable d'instruments jusqu'alors inconnus. Il devient alors nécessaire de mettre en œuvre de nouveaux systèmes de classification, suffisamment universels pour gérer efficacement ces collections, que ce soit pour leur conservation ou leur présentation au public.

Par ailleurs, les développements de l'organologie et de l'ethnomusicologie entraînés par cette abondance de nouveaux objets d'étude rendent nécessaires l'existence d'outils de représentation plus complets et mieux construits que ceux qui ont précédé.

Les classifications vernaculaires, même si elles peuvent présenter des bases « solides » pour une approche systématique, s'avèrent insuffisantes dans ce nouveau contexte.

Ainsi, au contraire des classifications vernaculaires, les classifications construites à partir de la du XIXe siècle (majoritairement en occident, dans un premier temps) ne concernent pas seulement les instruments existant dans les cultures où elles voient le jour, mais sont conçues avant tout de façon à intégrer les instruments du monde entier, connus ou encore à découvrir. Etant donné l'énorme quantité de données à intégrer, il est évident que la construction de ces systèmes demande une rigueur logique maximale. En particulier, les auteurs tentent autant que possible ne n'appliquer qu'un seul

critère à chaque niveau de division, approche permettant une compréhension et une mémorisation plus aisées du système.

Les classifications les plus connues, en particulier les trois premières présentées ci-dessous (Mahillon, Hornbostel – Sachs et Schaeffner), sont de type hiérarchique ; elles relèvent d'une approche de « haut en bas » (ou *top-down*), qui forme des sous-catégories de plus en plus précises à partir de l'ensemble de départ par l'application successive de critères de différenciation. Mais, comme nous le verrons, il existe également des systèmes de classification non hiérarchique procédant selon la démarche inverse, partant d'une description – parfois très détaillée – des instruments pour les regrouper ensuite selon des caractéristiques communes.

Comme pour la section précédente, il nous est impossible de donner ici une liste complète des classifications systématiques proposées à ce jour. Nous évoquerons seulement quelques unes des plus connues d'entre elles.

2.1. Classifications hiérarchiques

2.1.1. Mahillon

Acousticien, organologue et conservateur du Musée Instrumental du Conservatoire Royal de Musique de Bruxelles, Mahillon développe en 1893 la première classification systématique moderne [Kartomi 1990, p. 163]. Il s'agit d'un système hiérarchique à quatre catégories principales et quatre niveaux de division.

Le premier niveau comporte quatre catégories (ou *classes*) établies en fonction de la nature de la structure vibrante :

- les autophones, qui oscillent en raison de leur élasticité propre, sans phénomène de tension ;
- les membranophones (instruments à membranes) ;
- les cordophones (instruments à cordes) ;
- les aérophones (instruments à vent).

Au deuxième niveau, les instruments sont classifiés en *branches* selon le mode d'excitation (par exemple, le frottement, le pincement et la percussion pour les cordophones).

Au troisième niveau, le critère de classification en *sections* est variable selon la classe et la branche. Pour une partie des autophones et tous les membranophones, ce critère est la capacité de l'instrument à produire des sons ayant une hauteur déterminée. Pour les cordophones et les aérophones, il porte sur le mécanisme permettant l'excitation (par exemple un archet, une roue, un clavier ou un mécanisme automatique pour les cordes frottées) ou sur la nature précise de la structure vibrante et la morphologie globale de l'instrument (par exemple anche simple ou double, avec ou sans tuyau, pour les instruments à anche).

Enfin le quatrième niveau distingue les instruments selon des critères morphologiques précis, comme la forme cylindrique ou conique du tuyau pour les instruments à anche.

Mahillon met en place une nomenclature utilisant une combinaison de chiffres et de lettres pour désigner les sous-catégories de son système. On peut ainsi parler d'une sous-catégorie sans avoir à lui donner un nom, ce qui présente plusieurs avantages. Tout d'abord, il peut être très difficile de trouver un nom à toutes les sous-catégories (particulièrement celles se trouvant au « cœur » de la hiérarchie) : pour les désigner, il faudrait alors énumérer la liste des critères auxquels elles répondent, ce qui serait pour le moins fastidieux. A l'inverse, lorsque des noms existent, ils peuvent être controversés, et ne sont de toute façon pas partagés dans le monde entier. Un système de nomenclature alphanumérique

systématique permet donc d'une part un repérage rapide de l'information dans le cadre d'un système hiérarchique et d'autre part garantit une certaine universalité du système, dans le sens où celui-ci est facilement accessible à d'autres cultures que celle de son auteur.

La nomenclature mise en place par Mahillon est la suivante :

- les classes sont numérotées de I à IV
- les branches sont dénotées par des lettres majuscules (A, B, …)
- les sections sont dénotées par des lettres minuscules (a, b, …)
- les sous-sections sont dénotées par deux lettres minuscules (aa, bb, …)

Ainsi, la catégorie des instruments à cordes (classe IV) pincées (branche B) avec ou sans plectre (section a) et disposant d'un manche (sous-section bb) est désignée par la suite alphanumérique suivante : IV-B-a-bb.

2.1.2. Hornbostel – Sachs

En 1914, Hornbostel et Sachs proposent une nouvelle classification [Hornbostel & Sachs 1914] qui s'inspire clairement de celle de Mahillon, tout en l'enrichissant considérablement, puisque le nombre maximal de niveaux n'est pas limité et atteint jusqu'à neuf dans un exemple donné par les auteurs. Ceux-ci considèrent leur système comme une base ouverte qui sera nécessairement amenée à être étendue selon les besoins ultérieurs, comme le montre la deuxième partie du titre de leur article : « *Ein Versuch* » (un essai, une tentative). Cette classification est actuellement la plus communément utilisée.

Les quatre catégories du niveau supérieur et leur principe de séparation (fondé sur la nature de la structure vibrante ou, selon les propres termes des auteurs, « les caractéristiques physiques de la production sonore » [Hornbostel & Sachs 1914]) sont conservés par rapport au système de Mahillon. La seule différence à ce niveau est le changement de nom de la première catégorie, les autophones, qui deviennent les *idiophones*.

Pour tous les autres niveaux de la classification, les critères diffèrent selon la catégorie ou la sous-catégorie considérée – toutefois, une sous-catégorie donnée est si possible subdivisée selon un seul critère, ce qui doit assurer la cohérence logique de l'ensemble. Par exemple, les idiophones et les membranophones sont classifiés en fonction du moyen d'excitation, tandis que les aérophones sont séparés en deux sous-catégories selon que l'air mis en vibration est confiné à l'intérieur de l'instrument ou non. Les auteurs ont choisi le critère semblant le plus approprié pour chaque sous-catégorie d'instrument. Ainsi, il est difficile de décrire la classification Hornbostel – Sachs (dénommée H/S dans la suite du texte) autrement qu'en présentant l'arborescence entière et en l'examinant sous-catégorie par sous-catégorie. On notera qu'aucune distinction n'est établie en fonction des matériaux constituant les instruments.

Tout comme Mahillon, les auteurs utilisent une désignation systématique des catégories et sous-catégories. Ils font cependant uniquement appel aux chiffres, choix qui rend ce système de nomenclature plus universel, dans la mesure où les chiffres arabes sont lus pratiquement dans le monde entier, contrairement à l'alphabet occidental, utilisé par Mahillon.

Au niveau supérieur, les catégories des idiophones, des membranophones, des cordophones et des aérophones sont numérotées de 1 à 4 (dans cet ordre). Ensuite, un nouveau chiffre est ajouté au précédent à chaque fois que l'on descend dans la classification. Les décimales sont groupées par trois pour plus de lisibilité. Le Tableau 4 présente la façon dont les cloches utilisées dans les églises occidentales sont classées dans ce système.

Tableau 4 : Classification complète de la sous-catégorie contenant les cloches d'église dans le système H/S

111.242.122 : cloches suspendues à battant		
111 : idiophone (1) + frappé (1) + frappé directement (1)	242 : percuté (2) + de type « récipient »[37] (4) + de type cloche (2)	121 : cloche indépendante (1) + suspendue (2) + à battant (2)

Le concept global d'instrument développé dans les travaux de Hornbostel et Sachs est très large, puisqu'il comprend aussi bien les aspects acoustiques et morphologiques que musicaux, historiques, sociaux, etc. Mais, devant la nécessité pratique d'une classification hiérarchique universelle qui ne peut évidemment pas prendre en compte l'ensemble de ces paramètres, les auteurs se résolvent à restreindre pour celle-ci leur concept d'instrument aux aspects purement physiques. Une telle classification ne se suffit bien sûr pas à elle-même et ne doit être considérée que comme l'un des outils de l'organologue ou de l'ethnomusicologue, puisqu'elle est susceptible de ressembler dans une même sous-catégorie des instruments que séparent des milliers de kilomètres ou des siècles d'histoire. D'autres outils sont donc à développer pour compléter la classification en portant l'information sur les aspects laissés de côté. C'est ce que plusieurs auteurs se sont récemment attachés à faire, comme nous le verrons ci-dessous.

2.1.3. Schaeffner

La classification établie en 1932 par André Schaeffner [Schaeffner 1994] se distingue de la majorité des autres classifications hiérarchiques du XXe siècle par le fait qu'elle comporte seulement deux catégories au niveau supérieur – se rapprochant en cela de la classification de Pollux déjà évoquée. Accordant une très grande importance à la rigueur logique de construction de sa classification, Schaeffner rejette la division quadripartite dominante et en particulier le système H/S, principalement en raison de critiques à l'encontre de la catégorie des idiophones. Selon lui, celle-ci n'est pas cohérente car elle inclut des instruments, comme la sanza africaine, dont seule une partie est source du son (les lamelles en métal dans ce cas) et non le corps de l'instrument en lui-même, comme le laisse entendre la définition stricte des idiophones. En d'autres termes, Schaeffner refuse d'appeler idiophone un instrument qui comporte une structure vibrante clairement différenciée de ses autres parties.

Schaeffner propose les deux catégories principales suivantes :

I. Les instruments à corps solide vibrant

II. Les instruments à air vibrant

Les instruments à corps solide vibrant sont ensuite subdivisés en trois sous-catégories – dont les deux premières recouvrent les idiophones du système H/S – selon la nature du corps vibrant (c'est-à-dire de la structure vibrante) :

A. Corps solide non susceptible de tension

B. Corps solide flexible

C. Corps solide susceptible de tension

Avec cette formulation, les catégories A et B ne semblent pas exclusives, on doit donc préciser que la

[37] Cette catégorie morphologique comprend, en plus des cloches, les gongs. Les catégories voisines contiennent des instruments tubulaires, des plaques et des tiges.

catégorie A contient les instruments à structure vibrante « rigide »[38], comme le vibraphone ou le marimba, ce qui exclut tous les instruments de la catégorie B, dont la structure vibrante (lamelle, languette, tige) se déforme de façon beaucoup plus importante.

Les catégories A et B sont à nouveau subdivisées selon le matériau principal de l'instrument, puis selon des critères morphologiques ; la catégorie C est subdivisée en instruments à corde ou à membrane, à leur tour distingués selon des critères morphologiques.

Les instruments à air vibrant sont également subdivisés en trois sous-catégories :

A. Les instruments à air ambiant, qui ne comportent aucune cavité ;

B. Les instruments à cavité libre ;

C. Les instruments dits à vent (à embouchure terminale ou latérale).

Bien que le système de Schaeffner soit d'une logique presque irréprochable, le nom choisi pour les catégories principales est critiquable dans la mesure où certains instruments « à air vibrant » comportent également un « corps solide vibrant » (les lamelles de l'harmonica ou l'anche de la clarinette). Pour éviter toute confusion, il faut alors préciser que dans le cas des instruments à air vibrant, ces éléments sont mis en mouvement par l'air lui-même, tandis que les structures flexibles des instruments « à corps solide vibrant » (catégorie I.B) sont mises en mouvement directement par les gestes de l'instrumentiste (par exemple, par les mouvements des pouces pour la *sanza)*.

2.1.4. Galpin

Galpin a proposé deux classifications des instruments de musique, la première publiée en 1910 [Kartomi 1990, p. 165] et la seconde en 1937 [op. cit., p. 176 ; Galpin 1937]. Cette dernière est remarquable pour être la première à intégrer les « instruments électroniques », alors nommés *électrophones* (cf. Section 3).

Les deux classifications reposent sur un principe de division quadripartite identique à celui de Mahillon et de Hornbostel et Sachs. Dans la première, les quatre *classes* sont nommées ainsi :

A. Substances sonores

B. Membranes vibrantes

C. Instruments à vent

D. Instruments à cordes

Dans la deuxième classification, les noms adoptés sont identiques à ceux choisis par Mahillon : autophones, membranophones, aérophones et cordophones. A ces quatre catégories « classiques » vient s'ajouter celle des électrophones.

2.1.4.1 Première classification

La première classification de Galpin, bien que pouvant en principe prendre en compte les instruments du monde entier, est clairement focalisée sur les instruments occidentaux puisque le deuxième critère de classification est la présence d'un clavier, d'un mécanisme automatique de jeu ou l'absence de l'un et de l'autre. Une immense majorité des instruments utilisés de par le monde entrent dans cette

[38] Une certaine élasticité est bien entendu nécessaire pour que la structure vibrante vibre, sans qu'on puisse pour autant parler de flexibilité, c'est-à-dire de la capacité de se déformer de façon clairement perceptible à l'échelle du geste.

troisième sous-catégorie, il est donc évident que la place accordée au critère correspondant est disproportionnée.

Le troisième niveau de classification utilise un critère variable suivant la sous-catégorie dans laquelle on se place. Les instruments à clavier des classes A et B sont répartis en instruments tonals et rythmiques ; ceux de classe C sont subdivisés selon le type de l'excitateur (flûtes, à anche, à embouchure, puis, par exemple, à anche simple, à anche double, etc.).

2.1.4.2 Deuxième classification

La deuxième classification de Galpin se rapproche de celles de Mahillon et de Hornbostel et Sachs ; abandonnant le critère de la présence d'un clavier ou d'un mécanisme automatique de jeu, elle peut prétendre représenter de façon beaucoup plus équilibrée l'ensemble des instruments de musique. Elle adopte également un système de nomenclature alphanumérique.

Le principe de la classification repose sur les critères suivants aux trois premiers niveaux : nature de la structure vibrante, type d'excitation, excitation directe ou indirecte. Par exemple, le piano est classifié comme un instrument à cordes excitées par percussion indirecte (le clavier et le mécanisme d'échappement s'interposant entre l'instrumentiste et la structure vibrante) tandis que le cymbalum est considéré comme un instrument à cordes excitées par percussion directe (bien que des mailloches soient utilisées).

Cette deuxième classification n'a pas connu le succès du système H/S, particulièrement en raison de certaines imprécisions dans sa définition et de son orientation quelque peu marquée vers les instruments occidentaux.

2.2. Classifications non hiérarchiques

Le principe fondamental des classifications non hiérarchiques est de considérer en premier lieu les caractéristiques de chaque instrument étudié, d'en donner une description aussi précise que possible, puis de regrouper ces instruments selon certaines de ces caractéristiques ; il s'agit donc d'une démarche « de haut en bas » (ou *bottom-up*). Cette approche est fortement marquée par une tendance très nette à l'enrichissement de la notion d'instrument, qui se trouve décrit non seulement par des critères morphologiques (encore plus nombreux que pour les classifications hiérarchiques), mais aussi culturels, sociologiques ou anthropomorphiques (c'est-à-dire des critères relevant de la relation physique entre l'instrumentiste et l'instrument).

Ces classifications ne présentent pas un profil aussi homogène que les classifications hiérarchiques. Celle de Hood [Kartomi 1990, p. 184] prend principalement la forme d'une vision très large de la notion d'instrument, concrétisée par un *organogramme*, diagramme complexe qui résume à lui seul l'ensemble des variables connues pour un instrument donné. Cette représentation particulière est destinée à compléter le système H/S, en fournissant des informations supplémentaires pour les catégories de plus bas niveau. Heyde, quant à lui, se concentre sur la réalisation de schémas représentant de façon très détaillée la chaîne instrumentale, du système nerveux de l'instrumentiste jusqu'à la partie de l'instrument assurant la diffusion du son [op. cit., p. 189]. L'une des classifications non hiérarchique les plus ambitieuses est celle entreprise par Dräger en 1947, qui définit pour chaque aspect considéré de l'instrument (morphologique, acoustique, timbral, tonal, etc.) un certain nombre de variables [op. cit., p. 178]. Rien que pour l'aspect morphologique (le seul que Dräger ait eu le temps de traiter de façon complète de son vivant), 14 variables différentes sont définies. Le projet de l'auteur était irréalisable sans l'aide d'un ordinateur, qui permette de rassembler l'ensemble des données recueillies dans une base permettant une consultation rapide et des traitements automatisés. Ramey

reprendra et développera cette approche dans les années 70, à l'aide des outils informatiques appropriés : il identifiera 39 variables morphologiques, 15 variables acoustiques et 21 variables anthropologiques [op. cit., p. 186]. Il disposera ainsi d'un véritable système d'information complet sur les instruments de musique.

Le développement des classifications non hiérarchiques est plus récent que celui des classifications hiérarchiques. Il coïncide avec la disponibilité croissante et la montée en puissance de l'outil informatique, support indispensable pour la réussite de travaux manipulant des quantités de données aussi considérables.

3. Les classifications systématiques des « instruments électroniques »

A la suite de Galpin, de nombreux auteurs introduisent dans leur classification une nouvelle catégorie correspondant aux appareils faisant appel à l'électricité pour produire des sons. Comme nous le verrons, l'utilisation de l'expression « instruments électroniques » à propos de ces derniers est discutable ; elle nécessite en tous cas une véritable réflexion. Nous nous l'autoriserons cependant le temps de présenter les principales classifications proposées.

3.1. Galpin (1937)

Galpin est le premier à introduire une catégorie regroupant les instruments faisant appel à l'électricité, dans sa deuxième classification de 1937 [Galpin 1937]. Cette nouvelle catégorie, celle des *électrophones* (« electrophonic instruments or electric vibrators »), est intégrée à la classification en conservant les critères régissant l'organisation des trois premiers niveaux pour les quatre catégories traditionnelles : nature du « corps vibrant » ; mode d'excitation ; excitation directe ou indirecte. Les électrophones sont définis par l'auteur, selon le premier de ces critères, comme les instruments pour lesquels « les ondes sonores sont formées par des oscillations engendrées dans des circuits électroniques ».

Les électrophones sont ensuite divisés en trois sous-catégories en fonction du type d'oscillateur :

- *Oscillateur électronique*. Cette sous-catégorie contient l'ensemble des synthétiseurs analogiques (dont le développement aura majoritairement lieu trente ans plus tard, à la fin des années 60), soit l'immense majorité des électrophones. Un autre instrument de cette sous-catégorie, connu par l'auteur cette fois, est le Theremin.
- *Oscillateur électromagnétique*, comme l'orgue Hammond où l'oscillation est induite par la rotation des roues phoniques. Entre également dans cette sous-catégorie le Telharmonium – en précisant toutefois que contrairement à ses voisins, celui-ci ne comportait pas de circuit d'amplification.
- *Oscillateur électrostatique*. Galpin regroupe dans cette sous-catégorie des instruments dont l'énergie d'excitation est d'origine électrique mais dont la structure vibrante est purement acoustique, par exemple l'orgue de théâtre et le carillon automatique.

Chaque sous catégorie est à son tour divisée selon le mode d'activation, direct ou indirect. Ce critère est peu utilisé pour des instruments électriques ou électroniques, dans la mesure où, le phénomène oscillatoire étant inaccessible aux gestes de l'utilisateur en raison de sa nature électrique, la plupart des électrophones ont un mode d'activation indirect. Les seules exceptions sont le Theremin et le Trautonium, pour lesquels les gestes de l'instrumentiste ont une influence physique directe sur les propriétés de l'oscillateur électronique qui produit le son.

Si les deux premières sous-catégories distinguées par Galpin sont tout à fait justifiées, la dernière ne semble pas réellement à sa place dans les électrophones. En effet, le critère de classification principal de Galpin étant la nature du corps vibrant, un carillon automatique ne devrait logiquement pas se trouver dans la même catégorie que l'orgue Hammond ou que le Theremin. Galpin préfère séparer complètement les instruments faisant d'une manière ou d'une autre appel à l'électricité des autres instruments plutôt que de respecter totalement la logique de sa classification. Ce qui peut paraître relativement étonnant aujourd'hui, alors que sons naturels et sons artificiels sont tellement mélangés dans la production musicale qu'on peine parfois à les distinguer, l'est sans doute moins si on se rappelle qu'à la publication de cette classification, les instruments faisant appel à l'électricité étaient suffisamment rares et cantonnés à des usages particuliers (cas des orgues de théâtre) pour qu'une catégorie les regroupant tous paraisse un choix logique.

3.2. Sachs (1940)

Une nouvelle catégorie d'instruments, nommés là aussi *électrophones*, est ajoutée par Sachs en 1940 aux quatre catégories du système H/S [Sachs 1940]. Les électrophones de Sachs sont divisés en trois sous-catégories qui diffèrent légèrement de celles proposées par Galpin, y compris au niveau de la terminologie employée :

- Les instruments *actionnés* par l'électricité, qui correspondent aux instruments à oscillateur électrostatique de Galpin.
- Les *instruments électromécaniques*, qui comportent le traditionnel couple excitateur – structure vibrante, purement mécanique, mais dont le son est produit ou amplifié électriquement.
- Les *instruments radioélectriques*, qui comprennent un ou plusieurs oscillateurs électroniques et correspondent donc à la première catégorie de Galpin.

La classification Hornbostel-Sachs étant la plus répandue et utilisée, l'organisation adoptée par Sachs pour les electrophones a soulevé plus de questions que dans le cas de Galpin. Selon Kartomi [Kartomi 1990, p. 173], la deuxième sous-catégorie n'est pas justifiée puisque les oscillations sonores sont engendrées par un moyen mécanique comme pour tous les instruments acoustiques, puis captées de façon électronique. D'après elle, en respectant strictement la logique de classification prévalant avant l'introduction des électrophones, qui veut que les instruments soient regroupés en catégories principales selon les « caractéristiques physiques de la production sonore », les instruments électromécaniques devraient plutôt être rangés parmi les instruments acoustiques de la même famille. Davies [Davies 1985] avance au contraire que, puisque le dispositif électronique – qui n'est pas nécessairement un simple microphone acoustique – est installé de façon permanente, il fait partie intégrante du mécanisme de production du son, ce qui justifie l'indépendance de la catégorie instruments électromécaniques. Dans le cas de la guitare électrique par exemple, le microphone électromagnétique capte directement le mouvement de la corde et non les ondes acoustiques, extrêmement faibles, que celui-ci engendre. C'est donc le système complet corde – microphone qui donne naissance au signal sonore. D'après Davies, le mécanisme de production sonore de la guitare électrique pourrait donc être rapproché de celui de l'orgue Hammond.

Cette controverse, qui tient pour partie à l'ambiguïté des termes choisis par Sachs et Hornbostel pour définir leur critère de classification et qui n'a pas de « bonne » ou de « mauvaise » réponse, souligne la difficulté de préciser ce qu'est un instrument et le rôle de chacun de ses éléments, difficulté encore

accrue dans le contexte de l'électronique. Il est clair que celle-ci introduit ici des éléments nouveaux dans un domaine où il était déjà parfois difficile d'y voir clair.

Ce cas met aussi en évidence une difficulté posée par le choix de construire une classification basée strictement sur des critères logiques, et en particulier sur un critère unique à chaque niveau de classification. S'il est indiscutable que, comme nous venons de le dire, la guitare électrique et l'orgue Hammond présentent une certaine similitude dans leur mécanisme de production sonore, le sens commun s'oppose cependant à voir rapprochés dans une classification deux instruments si différents par tous leurs autres aspects – à commencer par leurs morphologie et leur timbre. On peut alors se demander jusqu'à quel point la logique doit être appliquée dans la construction d'une classification et quelle importance peut, au contraire, être donnée aux critères non formalisés dès le départ.

3.3. Sakurai

Sakurai, dans sa classification des instruments de musique [Sakurai 1981] nomme les instruments électroniques *oscillator-vibrating instruments* et les caractérise de la façon suivante :

> « La vibration d'un oscillateur ou d'un circuit oscillatoire est la source primaire du son dans ces instruments. L'énergie vibratoire est générée par des signaux électriques. Dans ces instruments, le système de haut-parleurs, qui convertit les signaux électriques en vibrations de l'air, peut être vu comme une partie de l'instrument ayant une fonction similaire à celle du résonateur des autres instruments ».[39]

Comme pour toutes les catégories principales de son système, Sakurai subdivise les *oscillator-vibrating instruments* en deux sous-catégories, selon que l'instrument comporte un ou plusieurs vibrateurs primaires. Il ne donne aucune autre précision sur ces instruments.

L'aspect le plus intéressant de l'article se situe en réalité dans une note de bas de page, où Sakurai suggère de nommer *musical apparatuses* (appareils musicaux) les instruments de cette catégorie afin de les distinguer des instruments acoustiques. Bien qu'aucune précision ne soit donnée en ce sens par l'auteur, il est envisageable de voir dans cette remarque une remise en question du concept d'instrument dans le contexte des technologies électroniques, puisque le terme est remplacé par celui d'*appareil*, plus général. Ce changement permet par ailleurs de mettre sous cette dénomination des appareils remplissant des fonctions différentes de celle des instruments de musique, comme les processeurs d'effets ou les séquenceurs MIDI.

3.4. Bakan

Bakan et ses collègues [Bakan&al. 1990] ont proposé l'une des classifications les plus complètes des moyens électriques et électroniques de production du son. Cette classification s'intègre dans le système H/S et en reprend le principe de numérotation. Elle y ajoute un système de suffixes, sur lequel nous reviendrons. Présentée comme suffisamment flexible pour englober l'ensemble des appareils sonores électroniques, elle comporte des avancées majeures par rapport aux propositions précédentes, la prise en compte des outils numériques étant la plus importante d'entre elles. En revanche, elle présente un

---

[39] Traduction de l'auteur. Texte original :

« The vibration of an oscillator or oscillator circuit is the primary source of sound in these instruments. The energy for the vibration is generated by electric signals. The loudspeaker system in these instruments, which convert electric signals into air vibration, can be regarded as a part of the instrument having a similar function to that of the resonance body of other instruments. » [Sakurai 1981, p. 825]

certain nombre d'incohérences qui s'expliquent d'une part par l'évolution extrêmement rapide des technologies considérée et d'autre part, semble-t-il, par un manque d'expertise des auteurs dans le domaine de l'informatique musicale.

Le système proposé par les auteurs se révèle particulièrement intéressant par l'articulation de deux niveaux de classification complémentaires :

- Le premier niveau est une classification hiérarchique classique, comportant un nombre relativement limité de catégories et sous-catégories. Les critères de classification retenus portent sur la nature de l'instrument électronique (analogique ou numérique) et de son mécanisme de production sonore.
- Le deuxième niveau est non hiérarchique ; il est basé sur le système de suffixes, qui peuvent être accolés au nom des catégories hiérarchiques afin d'apporter des précisions supplémentaires sur les instruments qu'elles contiennent. On évite ainsi de tomber dans le piège de la multiplication des sous-catégories, qui rendrait le système global illisible, tant la diversité des instruments électroniques est grande.

3.4.1. Instruments électriques, amplifiés et electronophones

La première intention des auteurs est de clarifier la distinction entre les instruments électriques ou amplifiés, dont le mécanisme primaire de production sonore est identique à ceux de certains instruments acoustiques, et les autres « instruments » pour lesquels ce mécanisme fait directement appel à l'électronique. Les premiers sont rangés dans les quatre catégories classiques du système H/S (par exemple les cordophones pour les guitares électroacoustique et électrique), accompagnés du suffixe « A » s'il s'agit d'un instrument acoustique **a**mplifié (guitare électroacoustique) ou du suffixe « E » s'il s'agit d'un instrument **é**lectrique (guitare électrique). Les autres « instruments » faisant appel à l'électricité sont placés dans une cinquième catégorie nommée *électronophones*. Le choix du terme (qui dérive de « **électron**ique » et non de « **électr**ique »), permet d'éviter la confusion entre les deux types d'instruments en indiquant que cette cinquième catégorie contient uniquement les « instruments qui produisent le son par des moyens purement électroniques ».[40]

3.4.2. Le système GAMES

Les électronophones sont organisés selon le système GAMES (Generators And Modifiers of Electronic Sound) proposé par les auteurs. D'après ceux-ci, GAMES est différent de tous ses prédécesseurs par le fait que son organisation est aussi rigoureuse que pour les autres catégories principales du système H/S. En effet, la classification proposée intègre un nombre conséquent de sous-niveaux (jusqu'à 5 dans certaines branches), avec des critères de classification clairement défini pour chacun d'entre eux. Le Tableau 5 présente ce système sur ses trois premiers niveaux.

3.4.3. Les catégories principales

Les deux premières sous-catégories (Synthétiseurs et Echantillonneurs) sont tout à fait évidentes et justifiées. La catégorie des Hybrides est en revanche plus confuse : les auteurs y rangent les electronophones qui combinent plusieurs techniques de production du son, en particulier les synthétiseurs à table d'onde censés mimer le fonctionnement des oscillateurs. Les Hybrides incluent également des electronophone mélangeant synthèse et échantillonnage, ou simulant des phénomènes acoustiques comme la résonance par sympathie des cordes de piano (cas de la synthèse adaptative structurée du piano numérique Roland RD1000).

[40] Traduction de l'auteur [Bakan et al. 1990, p.40].

Tableau 5: Les trois premiers niveaux du système GAMES de classification des electronophones (d'après [Bakan&al. 1990])

5 Electronophones
51 Synthétiseurs
511 Analogiques
512 Numériques
52 Echantillonneurs
521 Analogiques
522 Numériques
53 Hybrides
531 Synthèse par table d'onde
532 Cross-table sampling[41]
533 Synthèse adaptative structurée
534 Arithmétique linéaire
535 Hybrides combinés

On peut légitimement s'interroger sur la présence de la synthèse par table d'onde dans la catégorie des hybrides. Cette méthode est en effet la première à avoir été utilisée pour la synthèse numérique du son, et sa conception ne relevait nullement d'une imitation des oscillateurs analogiques : elle répondait plutôt à une préoccupation beaucoup plus concrète, celle de générer avec efficacité les échantillons successifs constituant le signal numérique. Si cette méthode « imite » un phénomène, c'est simplement celui des oscillations sonores, il n'y donc aucune « hybridation » avec les synthétiseurs analogiques.

Par ailleurs, il faut prendre garde à ne pas considérer la catégorie des Hybrides comme un « fourre-tout » où l'on rangerait un peu facilement les dernières méthodes de synthèse disponibles sur les synthétiseurs commerciaux, sans forcément prendre le recul nécessaire pour identifier, derrière les termes techniques commerciaux, la nature des processus employés.

3.4.4. Principes de classification

Globalement, les électronophones sont subdivisés selon leur nature analogique ou numérique (la catégorie des Hybrides ne comporte que des appareils numériques), puis selon la nature du processus ou du mécanisme qui produit le son et enfin selon leur capacité à produire plusieurs sons à la

[41] Cette technique de synthèse est une dérivée de la synthèse par table d'onde utilisant trois tables pour produire le son. Le passage progressif de l'une à l'autre permettant de reproduire l'évolution « naturelle » d'un son (attaque, maintient, extinction). Il est un peu étonnant de voir un telle place accordée à une méthode restée très anecdotique, puisque utilisée sur un seul synthétiseur, le Ketek CTS-2000.

fois (monophonique, partiellement ou pleinement polyphonique[42]). Ce dernier critère n'est pas appliqué aux synthétiseurs logiciels faute de pertinence.

Les synthétiseurs numériques sont séparés en deux sous-catégorie, la première étant celle de la synthèse par ordinateur (512.1) et la deuxième celle des electrophones « à unité centrale autonome » (512.2), c'est-à-dire les synthétiseurs numériques, souvent équipés d'un clavier de type piano. Il est étonnant de constater que les auteurs n'attribuent pas à chacune des ces sous-catégories les mêmes méthodes de synthèse : par exemple la synthèse FM et la synthèse additive ne sont mentionnées que pour la catégorie 512.2, alors que c'est évidemment sur ordinateur qu'elles ont été utilisées pour la première fois.[43] Les auteurs passent à côté du fait que l'ordinateur peut supporter toutes les méthodes de synthèse connues tandis que seules certaines d'entre elles – souvent les plus simples – ont été implantées dans des synthétiseurs numériques.

3.4.5. Les Modificateurs et la chaîne instrumentale

Une autre nouveauté de la classification proposée par Bakan et ses collègues est la présence d'une catégorie d'appareils nommés *Modifiers*, que l'on pourrait traduire en français par le terme « Modificateurs ». Ils ont pour fonction de transformer les signaux qui leur sont fournis en entrée, qu'il s'agisse d'informations musicales (on parle alors de processeur musical) ou sonores (processeur sonore, ou plus communément, processeur d'effets). Les auteurs séparent clairement cette catégorie de celle des électronophones et ne l'intègrent pas à la classification H/S. Les Modificateurs ne sont pas considérés comme des instruments ; les auteurs proposent de les intégrer dans le processus global de production musicale (*music-making process*), soit ce que nous avons précédemment appelé la chaîne instrumentale. La chaîne donnée en exemple est la suivante :

Instrumentiste + Instrument + Modificateur + Environnement acoustique + Récepteur

Tandis que les processeurs sonores sont traités correctement (sont distingués modificateurs d'amplitude, de hauteur, de timbre et modificateurs temporels), la définition donnée pour les processeurs musicaux est pour le moins contradictoire puisque les auteurs précisent que cette catégorie est plus couramment nommée « Séquenceurs » ! Or, ceux-ci ne peuvent pas être considérés comme des modificateurs puisqu'ils reproduisent une séquence musicale stockée en mémoire au lieu de modifier une séquence donnée en entrée : ils occupent en fait la place de l'instrumentiste dans la chaîne instrumentale. Les auteurs auraient pu en revanche citer des exemples de programmes ou d'appareils réalisant effectivement des transformations de séquences musicales, comme le logiciel Q, les claviers arrangeurs (qui créent un accompagnement complet à partir des accords donnés par l'utilisateur), ou encore les patches réalisés avec The Patcher ou Max.

3.4.6. Le système de suffixes

Comme nous l'avons déjà vu en ce qui concerne les instruments amplifiés, les auteurs proposent l'utilisation d'un système de suffixes apportant des informations complémentaires sur les électronophones et les modificateurs. Ils permettent de préciser, par exemple, le type d'interface de jeu proposé (clavier, boutons, etc.), la possibilité pour l'utilisateur de sauvegarder ses paramètres de jeu, la présence d'une interface MIDI, etc. Notons également que les auteurs proposent une liste de suffixes

[42] Prenons l'exemple d'un synthétiseur disposant d'un clavier de 61 touches. S'il ne peut produire que 16 notes à la fois, il est dit « partiellement polyphonique ». En revanche, il est « pleinement polyphonique » s'il peut produire 61 notes simultanément.

[43] Notons par ailleurs que certains synthétiseurs analogiques sont également capables de produire des sons par modulation de fréquence, ce qui n'est pas mentionné par les auteurs.

pour les contrôleurs externes – majoritairement des contrôleurs MIDI, bien que cela ne soit pas précisé – sans en donner toutefois d'exemple d'utilisation.

L'utilisation des suffixes est une façon de contourner la difficulté, déjà évoquée pour les instruments acoustiques mais encore plus criante pour les electronophones, de créer une classification hiérarchique complète et purement logique, compte tenu de la multiplication des caractéristiques des objets à classifier. Pour illustrer ce point, prenons l'exemple de deux synthétiseurs d'une même marque, le second se distinguant uniquement du premier par la présence d'un lecteur de disquette.[44] Si cette caractéristique était prise comme critère de classification hiérarchique, ces deux appareils se retrouveraient dans des catégories séparées (plus ou moins éloignées, selon la position du critère dans la hiérarchie) alors qu'ils sont quasiment identiques et qu'en particulier, ils proposent exactement les mêmes sons et la même interface de jeu, donc une expérience identique du point de vue de l'instrumentiste. Il est donc évident que l'utilisation d'un simple suffixe permettant de les différencier est beaucoup plus pertinente.

3.5. Qu'est-ce qu'un « instrument électronique » ?

De façon générale, on peut dire que les ethnomusicologues et les organologues contemporains s'entendent tous sur la nécessité de faire apparaître dans leurs classifications une catégorie d'instruments faisant appel à l'électricité, nommés généralement *électrophones* ou *électronophones* (nous utiliserons le deuxième terme dans la suite de ce document). A l'exception des travaux de Bakan et de ses collègues, cette nouvelle catégorie ne représente qu'une partie très restreinte des outils de production sonore apportés par les nouvelles technologies. Le fait le plus significatif est l'absence totale de la synthèse numérique de ces classifications. Pour les plus anciens systèmes (Galpin et Sachs), cela n'a rien d'étonnant, étant donné que cette technologie n'existait pas encore au moment de leur publication. En revanche, cette absence pose question pour les classifications plus récentes ; Kartomi est l'un des rares auteurs à évoquer la synthèse numérique [Kartomi 1990, p. 174], en utilisant d'ailleurs à une seule reprise le terme *instrument* pour désigner des processus de synthèse par ordinateur. Par ailleurs, les publications récentes en organologie, comme les articles du *Galpin Society Journal*, ne semblent montrer aucune inversion de cette tendance.

Face à ce constat, une question essentielle se pose : peut-on parler *d'instrument* à propos de tous les appareils ou processus électroniques permettant la synthèse du son ? La majorité des organologues semblent répondre par la négative à cette question : les électronophones se limitent pour eux aux appareils à oscillateur électronique ou électromagnétique auxquels s'ajoutent, selon les auteurs, les instruments électriques et amplifiés.

Si l'instrument de musique est simplement défini comme un objet produisant des sons dans un but musical, alors n'importe quel appareil électronique permettant de synthétiser un son – par exemple un ordinateur exécutant GENESIS – est effectivement un « instrument électronique ». Cependant, s'en tenir à un point de vue aussi simple, extrêmement réducteur vis-à-vis de la notion d'instrument, nous ferait passer à côté de tout l'enjeu de l'introduction des nouvelles technologies dans la création musicale.

[44] Ce critère n'est pas pris en compte, mais aurait très bien pu l'être, puisque les auteurs proposent l'utilisation du suffixe My pour indiquer que l'electrophone dispose d'une mémoire interne (*on-board memory*).

3.5.1. La notion d'instrument à l'ère numérique

Comme nous l'avons vu dans ce chapitre, on peut décrire les instruments de musique acoustiques par de très nombreuses variables qui présentent, pour chacune d'entre elles, une *permanence* due à la nature physique de l'objet ; de façon évidente, c'est cette permanence qui permet d'appréhender un objet comme une entité stable, bien identifiable. Un instrument acoustique peut ainsi être caractérisé par :

- un principe de production sonore qui, comme nous l'avons vu, constitue le critère de plus haut niveau dans la plupart des classifications ;
- des sons individuels possédant chacun un timbre particulier ;
- un timbre instrumental, construction cognitive basée sur la causalité physique de l'objet et liant entre eux tous les sons individuels pouvant être émis par l'instrument [Schaeffer 1966] ;
- des modes de jeu.[45]

Que deviennent ces variables à l'ère numérique ?

Une première remarque s'impose : un ordinateur peut exécuter une multitude de logiciels de synthèse sonore basés sur des principes complètement différents. L'ordinateur n'est donc pas un instrument de musique en soi. Par ailleurs, un logiciel de synthèse, tout particulièrement s'il est modulaire, peut produire des sons de plusieurs façons. Il n'y a souvent ni permanence du principe de production du son, ni *a fortiori* du timbre, qu'il soit sonore ou instrumental. Enfin, un logiciel de synthèse, pour un algorithme de génération et des paramètres donnés – ce qui fixe à la fois le principe de production du son et le timbre – peut être « joué » à l'aide d'interfaces très différentes grâce à des protocoles comme MIDI ou Open Sound Control [Wright&al. 2003]. Il n'y a donc pas de permanence des modes de jeu.

Les même remarques sont également valables pour les synthétiseurs numériques – qu'on peut d'ailleurs considérer comme des ordinateurs « fermés » pourvus d'une interface spécialisée – et les synthétiseurs analogiques modulaires, qui proposent bien un mode de jeu de base[46] (le plus souvent, le clavier) mais ne présentent pas de permanence du timbre, voire pas de permanence du principe de production sonore. Par exemple, le célèbre Yamaha DX7 proposait 32 façons d'interconnecter ses 6 oscillateurs, soit autant de processus différents de synthèse du son.

Ainsi, on voit bien que les variables caractéristiques des instruments acoustiques perdent toute consistance quand on s'intéresse à la synthèse du son à l'aide des nouvelles technologies. Seuls des appareils comme le Theremin, le Mellotron, l'orgue Hammond et plus généralement les synthétiseurs analogiques non modulaires restent relativement proches du concept d'instrument tel que nous venons de l'énoncer au travers de ces quatre valeurs. Il est donc relativement tentant de les appeler des « instruments électroniques ».

3.5.2. Geste et énergie

Cependant, un aspect que nous n'avons pas encore abordé sépare catégoriquement tous les instruments acoustiques (qu'ils soient amplifiés ou non) des autres appareils de production sonore : celui du geste et de l'énergie.

---

[45] Les modes de jeux présentent une certaine variabilité dans le temps, due à l'évolution des pratiques musicales. Ainsi, ce n'est qu'à partir du XXème siècle que le piano a été ponctuellement utilisé comme un instrument à cordes pincées.

[46] Ce mode de jeu peut généralement être remplacé par n'importe quel autre grâce au protocole MIDI.

En effet, comme le souligne Cadoz [Cadoz 1999a], le passage des instruments acoustiques aux électronophones et aux processus de synthèse numérique se caractérise par une rupture fondamentale, qui réside dans le fait que l'énergie qui anime le système oscillatoire dans les seconds n'est plus d'origine humaine comme pour les premiers. En effet, ce ne sont pas les gestes de l'instrumentiste qui fournissent l'énergie qui fait osciller les circuits électroniques des synthétiseurs Moog ou les générateur audio de Max/MSP : c'est l'électricité qui en est la source. Le processus de production sonore – qu'il s'agisse d'un oscillateur électronique ou d'un algorithme – devenant impalpable, une *interface* vient nécessairement s'intercaler entre celui-ci et l'instrumentiste. A l'exception des périphériques à retour d'effort, cette interface ne permet qu'une communication unidirectionnelle avec l'appareil et n'apporte aucune information tactile ou haptique sur l'état de ce processus à l'instrumentiste, lequel se retrouve alors dans une situation de *contrôle* et non plus d'interaction comme c'est le cas avec les instruments acoustiques. Ceci a, comme nous l'avons déjà souligné, des conséquences très importantes sur la richesse de la relation entre l'instrumentiste et le processus de production sonore, notamment au niveau de l'expressivité. Nous ne nous attarderons pas sur l'importance de ces changements, qui est largement commentée dans la littérature en informatique musicale. Mais si un doute subsistait encore sur le fait qu'on ne peut pas nommer *instruments de musique* les appareils musicaux électroniques et numérique sans repenser entièrement ce concept, la question du geste et de l'énergie en apporte la preuve définitive.

3.5.3. Retour aux classifications

On peut toujours, à un niveau d'analyse élémentaire, qualifier « d'instrument de musique » tous les appareils électroniques permettant de produire des sons. Néanmoins, nous venons de montrer que des différences fondamentales les distinguent des instruments acoustiques. L'expression « instruments électroniques » est en réalité un raccourci pratique pour désigner un ensemble d'appareils et de technologies extrêmement variés permettant la synthèse (voire le traitement) du son. Quelque peu trompeuse, elle contient la promesse implicite que les technologies numériques offrent un niveau d'expressivité équivalent à celui des instruments acoustiques. Il s'agit d'une fausse promesse, à moins que la situation instrumentale ne soit simulée de façon complète et multisensorielle, en particulier avec la prise en compte de la bidirectionnalité du canal gestuel.

Il n'entre pas dans nos objectifs d'aller plus loin dans la discussion de la notion d'instrument de musique à l'ère numérique. Pour conclure, revenons-en simplement aux classifications auxquelles nous nous intéressions. D'après ce que nous venons de dire, nous estimons qu'il est tout à fait justifié de ne pas inclure la majorité des nouveaux outils de production sonore dans les classifications des instruments de musique. Les électronophones « classiques », c'est-à-dire tous les appareils analogiques non modulaires permettant de produire un son, présentent une permanence suffisante au niveau des variables que nous avons évoquées ci-dessus pour qu'on puisse effectivement les considérer comme des instruments (électroniques) et les intégrer à une classification générale, pourvu qu'on prenne la précaution de signaler la *rupture du continuum énergétique* [Cadoz 1999b] qui les caractérise. Leur situation est en réalité très proche de celle de certains instruments acoustiques, comme l'orgue à tuyaux dont le statut d'instrument de musique n'est contesté par personne.

En revanche, en ce qui concerne les synthétiseurs analogiques modulaires et les processus de synthèse numériques, leur variabilité est telle (que ce soit au niveau du processus de production sonore, du timbre ou des modes de jeu) qu'il nous semble incohérent des les inclure dans les électronophones, sans même aborder la question du geste. La classification proposée par Bakan et ses collègues a une structure générale tout à fait logique (bien que critiquable sur certains aspects précis). Néanmoins, elle ne devrait pas être présentée comme une classification des *instruments de musique*, mais tout

simplement comme une classification des différents *outils électroniques et numérique de synthèse et de traitement des sons*, ce qui n'est définitivement pas la même chose.

4. Conclusion

Le rapide parcours que nous venons de réaliser montre en premier lieu qu'il n'y a pas de classification « vraie », idéale et universelle des instruments de musique, mais un ensemble de classifications adaptées à des usages donnés, qui présentent toutes des avantages, des inconvénients, et des imperfections.

Les classifications hiérarchiques sont globalement plus adaptées au « rangement », à la conservation, tandis que les classifications non-hiérarchiques favorisent l'étude, l'analyse. Les premières tentent de proposer une structuration parfaitement logique avec, par exemple, l'utilisation, dès que cela est possible, d'un seul critère de différenciation par niveau ; mais il y a nécessairement des failles (contradictions, ambiguïtés, redondances, etc.) dans leur construction, car le monde réel, même en ne considérant que des objets créés par l'Homme, ne se laisse jamais organiser de façon parfaite, univoque. Les classifications non hiérarchiques n'ont pas à répondre aux mêmes contraintes. La difficulté de leur construction réside plutôt dans le choix des (nombreux) critères à appliquer aux instruments et dans la gestion de l'énorme quantité d'informations qui en découle. Contrairement aux classifications hiérarchiques, elles ne résultent pas dans un objet conceptuel « statique » qui – aussi complexe soit-il – pourrait être appréhendé comme une entité bien identifiable, mais dans un système dynamique adapté à une consultation de type « base de données ». Il est plus difficile de s'en faire une représentation mentale ; elles répondent donc moins bien au principe d'économie cognitive. En revanche, elles sont potentiellement beaucoup plus riches d'informations et sont libres des contraintes logiques qui pèsent sur les classifications hiérarchiques.

Loin d'être contradictoires, classifications hiérarchiques et non hiérarchiques sont au contraire complémentaires, et ont souvent été mises en relation, comme c'est le cas dans les travaux de Dräger, Hood ou Ramey, dont chacun s'intègre, d'une manière ou d'une autre, au système H/S. Cette articulation des deux types de classifications démontre tout son intérêt dans le système GAMES, où elle permet de garder une hiérarchie de taille raisonnable, tout en apportant une quantité importante d'informations sur les éléments classifiés grâce au système des suffixes.

Nous avions annoncé, en introduction de ce chapitre, que ce parcours des classifications des instruments avait pour objectif principal d'identifier les méthodologies et les critères utilisés afin d'en étudier la pertinence dans le cadre de la conception de l'Instrumentarium GENESIS. Quelles conclusions pouvons-nous maintenant tirer ?

En ce qui concerne les méthodologies, il nous semble évident qu'une approche de type *bottom-up*, non hiérarchique, est la mieux adaptée à l'établissement d'une classification *générale* des modèles GENESIS. En effet, ceux-ci sont d'une telle diversité qu'il est à priori irréaliste de concevoir une hiérarchie logique qui soit réellement utilisable en situation de création : elle risquerait fort d'être au moins aussi complexe que le système H/S, qui, rappelons-le, comporte jusqu'à 9 niveaux de divisions pour certaines branches ! La pratique d'un tel système est clairement « une affaire de spécialistes » ; ce n'est pas le type d'approche qu'il est souhaitable de proposer à un utilisateur de GENESIS, *a fortiori* s'il s'agit d'un débutant. Si une librairie comportant plusieurs centaines de modèles doit être proposée avec l'environnement, il nous semble bien plus approprié de la présenter sous la forme d'un système non hiérarchique, consultable, par exemple, à l'aide d'un ensemble de mots clés et de catégories bien définies. Pour autant, nous ne rejetons pas totalement les approches hiérarchiques. Il est tout à fait

envisageable de proposer à l'utilisateur un certain nombre de classifications de ce type, couvrant chacune un domaine restreint des modèles GENESIS ou de leurs composants. Ces « petites hiérarchies » spécialisées, semblent tout à fait adaptées pour l'initiation à l'environnement, car elles permettraient de présenter de façon synthétique des aspects précis et importants, comme les différents types de structures vibrantes ou d'interactions non linéaires. Par ailleurs, nous retiendrons de la classification de Bakan et de ses collègues l'idée d'utiliser des suffixes, qui pourrait s'avérer pertinente pour la nomenclature des modèles de la librairie

Quant aux critères de classification, plusieurs remarques s'imposent. Tout d'abord, les critères concernant les aspects socioculturels des instruments de musique ne peuvent pas être appliqués aux modèles GENESIS, pour des raisons évidentes. Seuls les critères correspondants à des aspects physiques peuvent être retenus. De plus, les critères purement morphologiques, dans le sens géométrique du terme, ne sont pas applicables tels quels, car la notion de *forme* n'est pas définie pour un réseau CORDIS-ANIMA unidimensionnel. En revanche, il est possible de définir des critères *topologiques*, portant sur la structure des modèles ou de leurs composants.

Deux critères sont souvent utilisés dans les classifications que nous avons vues : la nature de la structure vibrante et le moyen d'excitation. Ils pourront être tous les deux appliqués dans l'Instrumentarium, de façon totalement indépendante : les structures vibrantes GENESIS peuvent généralement être excitées en utilisant n'importe quel mécanisme d'excitation connu (ce qui permet d'ailleurs d'obtenir des résultats sonores très différents), contrairement aux instruments réels qui sont étroitement liés à des modes d'excitation en nombre très restreint. Néanmoins, pour certains modèles (comme les modèles d'instruments à vent), structure vibrante et mécanisme d'excitation seront indissociables.

Le critère de classification en fonction des matériaux ne semble par pertinent pour l'Instrumentarium, même si nous avons vu qu'il est possible de reproduire la « signature sonore » d'un matériau grâce à CORDIS-ANIMA. En effet, la simulation d'un matériau donné n'est pas une caractéristique fondamentale d'un modèle : elle dépend simplement du rapport entre la raideur et la viscosité de la structure vibrante, qui peut être modifié très rapidement. Quant au timbre, il pourrait certainement être un critère intéressant si sa définition, comme nous l'avons fait remarquer dans l'Introduction de ce document, n'était pas aussi complexe et encore mal cernée.

Au final, il apparaît, qu'une partie seulement des critères de classification utilisés pour les instruments acoustiques sont transposables dans l'univers GENESIS et que de nombreux autres critères devront être identifiés pour refléter les spécificités des modèles CORDIS-ANIMA.

En ce qui concerne les classifications des électronophones, on trouve le principe de production sonore comme critère principal chez Galpin et Sachs. Il est la contrepartie du critère « nature de la structure vibrante » utilisé pour les instruments acoustiques, mais il est étudié de façon beaucoup moins générale que pour ceux-ci. Dans la classification de Bakan et al., qui prend en compte un nombre bien plus élevé d'appareils et de processus de production sonore, ce même critère est utilisée d'une façon beaucoup plus détaillée, à différents niveaux. En ce qui concerne les appareils et processus numériques, on aboutit en réalité à une classification des techniques de synthèse du son. Les autres critères principaux sont la polyphonie et, pour la synthèse numérique, la nature du « support » (ordinateur ou synthétiseur spécialisé). Ces différents critères n'ont pas de pertinence particulière pour l'Instrumentarium GENESIS.

Conclusion

L'électronique et l'informatique ont apporté quantité de nouveaux outils pour la création musicale, dont ils questionnent profondément tous les aspects, de la notion d'instrument de musique à celle d'écriture musicale. Si certains de ces outils, par exemple les logiciels d'édition de partitions, s'inscrivent dans une certaine continuité avec les représentations et les concepts musicaux classiques, d'autres – par exemple les applications de création collaborative en réseau ou les langages de programmation musicale à la volée[47] qui comptent parmi les plus « révolutionnaires » – confrontent aussi bien les compositeurs et les musiciens que le public à des approches tranchant radicalement avec l'héritage musical, toutes cultures confondues.

Se pose alors la question de l'acceptation (voire du succès) de ces innombrables nouveaux outils, à une époque où l'informatique musicale est entrée dans le domaine commercial et fait partie intégrante du processus global de création et de diffusion de la musique. De nombreux facteurs, commerciaux (politique tarifaire, placement marketing, notoriété, intégration dans une gamme de produits, etc.) et techniques (réalisme des résultats sonores ou musicaux, ergonomie, interopérabilité, etc.), interviennent dans l'adoption ou le rejet d'un outil. Mais un autre critère peut intervenir : il s'agit de la qualité de l'environnement didactique disponible pour chaque outil, c'est-à-dire de l'ensemble des documents (manuels, tutoriels, librairies de configurations, exemples commentés, etc.) qui permettent d'appréhender ses possibilités, de s'en faire une représentation mentale et de les maîtriser.

Pour une majorité des outils se situant dans l'approche signal, ce facteur est certainement moins crucial que tous ceux que nous avons cités auparavant. En effet, la « culture signal » est d'ores et déjà suffisamment diffusée pour qu'un utilisateur ayant déjà une certaine expérience de l'informatique musicale puisse retrouver rapidement ses marques face à un nouveau synthétiseur logiciel, en s'aidant éventuellement du « Guide de prise en main rapide ».

La situation est très différente pour les outils basés sur la modélisation physique, a fortiori s'ils abordent tout le spectre de la création musicale comme c'est le cas pour GENESIS. On remarque que les environnements de synthèse par modélisation physique grand public se gardent, pour la plupart, de donner aux utilisateurs un accès direct à leur « cœur », à leurs processus internes. Ils adoptent, par exemple, une interface simplifiée permettant de manipuler des « méta-paramètres » plus intuitifs que les paramètres réels des algorithmes (cas de Pianoteq et de Brass), ou intègrent les modules physiques parmi dans un paradigme signal en offrant, dans le cas de Tassman, les représentations habituelles correspondantes (diagrammes de blocs ou visualisation des modules sous formes d'appareils physiques virtuels, avec potentiomètres, interrupteurs, boutons de sélection etc.). Une telle démarche est tout à fait compréhensible, puisqu'elle facilite l'accès à outils, les rends plus compréhensibles en les rattachant à des concepts et des représentations connus et concourt ainsi à leur succès. En contrepartie, elle ne donne pas accès à leur plein potentiel et contribue à former de la modélisation physique une image faussée et réduite.

La conception de l'Instrumentarium pour la création musicale CORDIS-ANIMA et de l'environnement didactique GENESIS adopte résolument une démarche différente. L'objectif est ici de laisser l'utilisateur manipuler le système de modélisation au niveau le plus élémentaire – tout comme l'utilisateur de Csound peut traiter chaque échantillon du signal sonore individuellement à l'aide de

[47] Cf. par exemple le langage ChucK [Wang&Cook 2003].

modules aussi simples que l'additionneur et le multiplicateur – car c'est la seule manière de lui donner accès à l'ensemble de ses possibilités. Mais là où Csound, pour ne citer que lui, bénéficie de la « culture signal », GENESIS ne peut que « compter sur lui-même » d'où l'importance cruciale du soin apporté à la conception et au développement de son environnement didactique et de son Instrumentarium. Le système CORDIS-ANIMA est trop éloigné des approches signal pour que les différents « instrumentariums » correspondants puissent nous servir de référence. Quant aux instrumentariums des environnements basés sur la modélisation physique, la situation n'est guère différente. Sans parler du fait qu'ils ne permettent pas d'aborder le niveau macro-temporel de la création, leurs approches de la modélisation physique ne sont pas directement compatibles avec celle de CORDIS-ANIMA et leurs modules élémentaires ne sont pas de même nature. Seuls certains concepts fondamentaux (comme les principaux types de structures vibrante et les différents modes d'excitation) sont partagés, mais ils ne pas sont du tout traités de la même façon à un niveau concret.

Au final, la seule référence pertinente pour le développement de l'Instrumentarium est l'étude des méthodes et des critères de classification des instruments de musique. Elle sera en particulier utile pour la création d'une librairie de modèles GENESIS. Mais la conception de l'Instrumentarium en tant que système conceptuel nous amènera également à classifier différentes entités (fonctions, composants,…). Nous retiendrons alors l'idée qu'une classification non hiérarchique, même si elle ne présente pas la même « lisibilité » qu'une classification hiérarchique (qui peut être représentée sous une forme synthétique et très courante, l'arbre) est plus adaptée à la prise en compte de critères nombreux et non exclusifs, que nous rencontrerons certainement en raison de la modularité élémentaire du système CORDIS-ANIMA et la grande diversité des modèles réalisables qui en découle.

Tous les développeurs d'environnements modulaires sont confrontés à la problématique de la conception d'un instrumentarium. La nature du système CORDIS-ANIMA, ou, plus précisément, la combinaison de sa modularité extrême et du fait qu'il est basé sur la modélisation physique, nous oblige à l'aborder d'une façon complètement nouvelle. Là où, pour les environnements basés sur une approche signal, la fourniture d'un ensemble riche et bien pensé d'exemples de configurations – faisant pour partie référence à cette fameuse « culture signal » – y répond en grande partie, nous devons *formaliser* complètement l'Instrumentarium avant de le réaliser, et ce en l'absence presque complète de références extérieures.

Partie B Formalisation de l'Instrumentarium GENESIS

Cette deuxième partie est consacrée à réalisation, par étapes successives, de l'Instrumentarium GENESIS en tant que système conceptuel clairement formalisé.

Nous commencerons, dans le Chapitre 3, par présenter les différents niveaux d'analyse de la situation de création musicale à l'aide du système CORDIS-ANIMA. Pour cela, nous adapterons la tripartition sémiologique de Molino au contexte de nos travaux, aboutissant à un schéma dans lequel le modèle se substitue à l'œuvre musicale. Nous identifierons alors les différents domaines de connaissance mobilisés pour la compréhension et la pratique de chacun des niveaux considérés.

Dans le Chapitre 4, nous étudierons précisément les aspects les plus élémentaires des modèles GENESIS : les différents types de constituants, d'interactions et de structures. Il s'agira avant tout de définir un vocabulaire stable et non ambigu pour la création musicale avec CORDIS-ANIMA. Par ailleurs, nous décrirons les quatre fonctions fondamentales qui doivent nécessairement être réalisées dans un modèle pour que celui produise un son musical.

Le Chapitre 5 rendra compte de l'étude d'un corpus de modèles GENESIS que nous avons réalisée afin de déterminer les catégories conceptuelles principales de l'Instrumentarium. Procédant selon une approche *bottom-up*, nous avons réalisé un « inventaire à la Prévert » des différents éléments rencontrés au cours de l'analyse de plusieurs centaines de modèles, inventaire que nous avons ensuite structuré en plusieurs catégories. Nous identifions ainsi six nouvelles fonctions élémentaires – facultatives, cette fois – qui viennent s'ajouter aux quatre fonctions fondamentales précédemment évoquées. En conclusion de ce chapitre, nous formulons l'organisation conceptuelle générale des modèles GENESIS, basée sur trois concepts : les *fonctions*, les *composants* et les *techniques de modélisation*.

Le Chapitre 6 présente de façon détaillée chacune des 9 fonctions élémentaires GENESIS, en donnant pour chacune d'entre elles des exemples de composants et de techniques de modélisation permettant de les réaliser.

Enfin, le Chapitre 7 réalise une synthèse des résultats des chapitres précédents, en étudiant trois principes généraux d'organisation des modèles : la composition des fonctions, la structuration des composants en niveaux hiérarchiques et la production d'évènements. Nous introduisons en particulier une nouvelle représentation, le *graphe fonctionnel*, qui permet de visualiser de façon simple les aspects de l'organisation d'un modèle liés à la réalisation des fonctions.

Chapitre 3. Niveaux d'analyse de la création musicale avec CORDIS-ANIMA

1. La tripartition de Molino et Nattiez

La formalisation de l'Instrumentarium se base sur une analyse structurée de la situation de création avec CORDIS-ANIMA. Par « structurée », nous entendons que cette analyse s'effectue selon plusieurs niveaux précisément définis qui sont nécessaires à une représentation claire et efficace de notre objet d'étude.

Comment avons-nous identifié ces différents niveaux ? Nous nous sommes basés sur l'un des paradigmes les plus courants de l'analyse de la situation de communication, la *tripartition* de Jean Molino, reprise par Jean-Jacques Nattiez dans son ouvrage « Fondements d'une sémiologie de la musique » [Nattiez 1975]. Bien que nos préoccupations soient quelque peu éloignées du domaine de la sémiologie musicale, ce paradigme nous est apparu comme un point de départ suffisamment général et reconnu pour nos propres travaux.

S'intéressant à la situation de transmission d'un message (en l'occurrence une *œuvre musicale*) entre le créateur et le récepteur (l'auditeur), la tripartition étudiée par Nattiez introduit, comme son nom l'indique, trois niveaux d'analyse, dont nous donnons ci-dessous une description simplifiée :

- Le niveau *poiétique* correspond aux stratégies de production de l'œuvre.
- Le niveau *neutre* est celui de l'œuvre en elle-même, en tant qu'*objet*.
- Le niveau *esthésique* correspond aux stratégies de perception de l'œuvre.

Nattiez résume la tripartition par le schéma suivant :

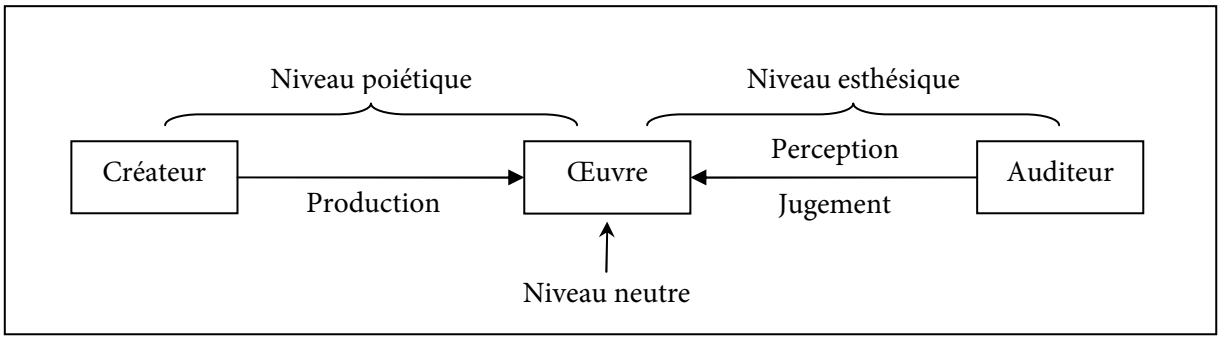


Figure 18 : La tripartition en sémiologique de la musique (d'après [Nattiez 1975, p. 52])

Nous n'aborderons pas le niveau esthésique qui est relativement étranger à nos objectifs. Nous nous contenterons de préciser que les niveaux ne sont pas imperméables les uns aux autres : en particulier, des éléments du niveau esthésique sont nécessairement présents dans le niveau poiétique. Comme le dit Nattiez : « il est évident que, du côté poiétique, le compositeur tient compte (en principe) de l'effet sonore de sa musique, et d'abord sur lui-même : il est le premier auditeur de ses propres œuvres. On ne saurait négliger, dans la description poiétique, les phénomènes de "perception intérieure". » [Nattiez 1975, p. 408] Ces questions débordent évidemment le cadre de nos travaux et concernent la problématique de la création musicale d'un point de vue général. Nous n'en dirons donc pas plus à ce sujet.

Il est important de définir plus précisément la notion *d'œuvre*. On notera dans la citation de Nattiez la référence au phénomène de « perception intérieure », qui précise que l'auteur place ses réflexions dans le cadre de la *musique écrite*. L'œuvre est alors un concept dual : à la fois objet conceptuel – succession de symboles placés dans le temps – représenté par la partition, et phénomène sonore produit par une interprétation.

Nous adopterons un cadre plus large, en considérant également la *musique pour bande* (ou *musique de sons* fixés) et la *musique mixte*. La notion d'œuvre devient alors plus trouble. En dehors du fait, commun à tous les types de musique, qu'une œuvre se traduit *in fine* par un phénomène sonore perçu et enregistrable, la question des représentations musicales se pose depuis le XXe siècle de façon cruciale dans un contexte où les pratiques musicales et compositionnelles, en particulier celles faisant intervenir l'informatique musicale, ont bousculé les conceptions antérieures, et plus particulièrement la notion d'*écriture*. La partition classique n'est plus nécessairement présente aujourd'hui : la musique est susceptible d'être produite à l'aide de procédés qui s'en passent complètement – c'est le cas avec GENESIS[48] – ou qui se basent sur de nouveaux formats (par exemple, les fichiers utilisés comme « partition électronique » dans Csound [Boulanger 2000, p. 7]). La plupart des outils de création numérique proposent une certaine représentation des évènements musicaux ou des phénomènes sonores. Par ailleurs, le créateur a toujours la liberté d'écrire la musique sous n'importe quelle forme qui lui convienne et qui soit adaptée aux outils qu'il utilise. Faut-il alors retreindre l'œuvre au seul phénomène sonore final, prendre en compte ces nouvelles représentations – y compris les représentations *ad hoc* que nous venons d'évoquer – ou encore élargir la notion aux processus mécaniques, électroniques ou informatiques qui génèrent le son et/ou la structure musicale ? Considère-ton un *patch* Max/MSP comme faisant partie de l'œuvre, ou seulement comme l'outil qui la produit ? Il s'agit d'un vaste débat qui relève de la musicologie et sort, là encore, de notre sujet.

2. Transposition à l'analyse de la modélisation

Le problème se pose différemment dans le cadre de nos travaux. Nous n'avons pas besoin de trancher les questions que nous venons de soulever, car l'objet de notre étude n'est pas le même que celui de la sémiologie musicale. En effet, nous ne nous intéressons pas de façon générale à la création d'œuvres, mais à la création de modèles physiques qui produisent des sons. Nous allons donc procéder à la substitution correspondante dans le schéma de la tripartition, en considérant que le résultat du processus de création est un modèle dont la simulation produit un phénomène sonore (Figure 19).

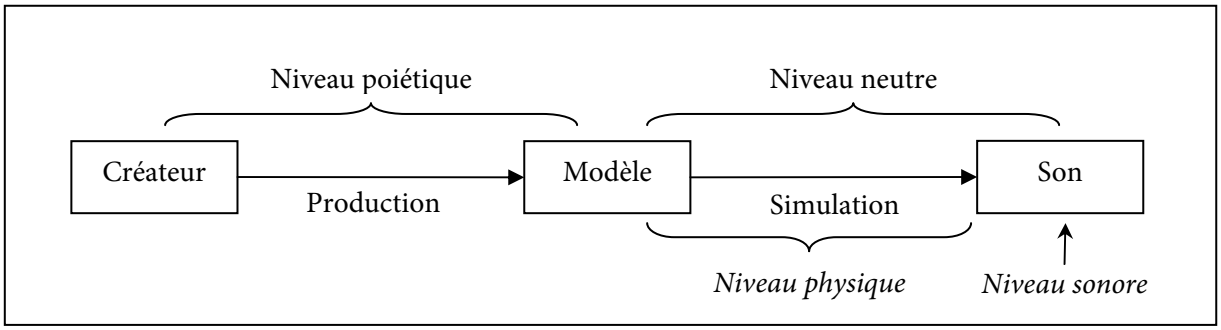


Figure 19 : Les niveaux d'analyse du processus de création avec GENESIS

[48] Nous voulons dire par là que GENESIS ne prend pas en entrée de données que l'on puisse considérer comme une partition. La suite des conditions initiales des déclencheurs d'un modèle s'approche de cette notion, mais elle ne représente qu'une partie, souvent infime, des informations nécessaires à la compréhension des évènements sonores produits par un modèle.

Dans ce nouveau schéma, le niveau poiétique désigne les stratégies de production du modèle, c'est-à-dire l'ensemble des approches et des techniques que peut adopter le créateur pour atteindre ses buts grâce à GENESIS.

Le niveau neutre, quant à lui, désigne tous les éléments objectifs de la situation, tout ce qui existe indépendamment du créateur. Le premier aspect de ce niveau est le modèle lui-même ; il est caractérisé par sa *structure* (cf. Chapitre 1, Section 1.5), ses *propriétés* intrinsèques et son *comportement* lors de la simulation, comportement qui peut être décomposé en phénomènes physiques associés aux mouvements des différentes parties du modèle. Cet ensemble d'éléments forme ce que nous appelons le *niveau physique*, en raison de la nature des objets et phénomènes considérés. Le deuxième aspect du niveau neutre, correspond tout simplement au signal sonore produit par le modèle : on l'appelle *niveau sonore*. Il est bien évidemment indissociable du niveau physique, puisque le son est l'un des phénomènes engendrés par la simulation du modèle. Il est toutefois pertinent de distinguer ce niveau en raison de la nature particulière du phénomène sonore. En effet, puisqu'il s'agit d'un *signal*, les outils dont on dispose pour l'analyser ne sont pas les mêmes que pour le niveau physique. De plus, ce phénomène se distingue de tous les autres par le fait qu'il est audible et que sa production est le but ultime du processus de modélisation.

Précisons que ce schéma n'est valable que dans le contexte de l'étude de la création avec GENESIS. Son niveau neutre ne coïncide pas nécessairement à celui de la tripartition de Molino et Nattiez : ce n'est le cas que si le son produit par le modèle est l'œuvre finale *et* que l'on considère le modèle comme faisant partie de celle-ci. Lorsque ce son est produit dans un autre objectif – par exemple pour être utilisé dans un montage sonore – ce que nous appelons ici niveau neutre est une partie du niveau poiétique dans le processus global : l'utilisation de GENESIS n'est alors qu'une étape parmi d'autres.

3. Niveaux d'analyse et domaines de connaissance

Lors du processus de création avec GENESIS, un utilisateur « navigue » continuellement entre les différents domaines de connaissance dont il a besoin pour réaliser ses objectifs : mécanique, mathématiques, informatique, acoustique instrumentale, pratiques instrumentales, théories du signal, organologie, perception et cognition auditive, théorie et écriture musicale, etc. Par exemple, le paramétrage de la raideur d'une liaison élastique relève de la mécanique, mais la décision de modifier ce paramètre d'une certaine manière peut découler d'une idée sonore ou musicale, qui fait elle-même suite à l'écoute du résultat sonore produit par le modèle dans ses versions précédentes.

Ces domaines peuvent être rattachés aux niveaux d'analyse que nous venons de définir :

<table>
<tr><th colspan="2">Niveaux</th><th colspan="2">Domaines</th></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Niveau poiétique</td><td><*Référence*
(domaine musical)></td><td>Acoustique instrumentale, organologie, perception et cognition auditive, pratiques instrumentales, théories du signal, théorie et écriture musicale, …</td></tr>
<tr><td><*Pratique*></td><td>Mécanique, mathématiques, informatique</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Niveau neutre</td><td><*Physique*></td><td colspan="2">Mécanique, mathématiques, informatique</td></tr>
<tr><td><*Sonore*></td><td colspan="2">Théories du signal</td></tr>
</table>

Figure 20 : Organisation des domaines de connaissance en fonction des niveau d'analyse de la situation de création et de perception musicale dans GENESIS

Plusieurs points de cette organisation méritent d'être explicités. Tout d'abord, nous avons divisé les domaines rattachés au niveau poiétique en deux groupes : ceux qui relèvent de la pratique concrète de l'environnement et dont les concepts sont directement manipulés, et ceux dans lesquels cette pratique vient « puiser son inspiration ». GENESIS n'implémentant pas directement de concepts sonores ou musicaux (ne serait-ce que les notions de note ou d'intensité), ces domaines doivent donc être considérés comme des domaines auxquels l'utilisateur se *réfère* lors du processus de création. Ensemble, ils sont les différentes facettes de ce qu'on peut appeler le *domaine musical*, au sens large du terme.

Imaginons par exemple qu'un utilisateur souhaite produire un glissando de Shepard-Risset avec GENESIS. Ce phénomène sonore particulier concerne le domaine de la perception auditive, puisqu'il produit une illusion de montée ou de descente perpétuelle de la hauteur. Afin d'obtenir le résultat attendu, il faut tout d'abord le comprendre à l'aide de l'outil d'analyse approprié de la théorie du signal, la transformation de Fourier ; on peut alors chercher le moyen de la produire, *en pratique*, avec un modèle CORDIS-ANIMA – ce qui aboutira à la mise au point d'une ou plusieurs techniques correspondantes.

L'acoustique instrumentale et l'organologie apparaissent au niveau poiétique car ces deux domaines sont susceptibles d'inspirer des stratégies de production pour l'organisation des modèles. Par exemple, les études menées à l'ACROE sur la modélisation de tables de résonance ou, plus récemment, sur le mécanisme d'échappement du piano, font directement référence à ces domaines. Quant à la technique du **Doigt***, elle s'inspire directement du geste consistant à appuyer sur une structure vibrante (corde, membrane) pour en modifier temporairement les propriétés (hauteur, modes de vibrations, amortissement, etc.) ; elle prend donc pour référence les pratiques instrumentales réelles.

Enfin, les mathématiques et l'informatique apparaissent dans la liste car certaines notions propres à ces domaines sont nécessaires à la compréhension (niveau neutre physique) et à l'utilisation (niveau poiétique) des composants dont le comportement présente des particularités dues à la nature discrète et simulée des modèles CORDIS-ANIMA.

Chapitre 4. Etude élémentaire des modèles

Tous les modèles CORDIS-ANIMA ont la même nature, dans le sens où ils sont représentés dans un seul formalisme et sont composés des mêmes modules de base. Il est cependant essentiel, pour la pratique et l'étude de la modélisation, de distinguer les différentes parties qui constituent un modèle et leurs relations, de la même façon que nous appréhendons naturellement notre environnement direct non pas comme un continuum inintelligible, mais comme un ensemble composé d'un nombre fini, éventuellement très élevé, d'éléments ayant une identité propre et des relations entre eux.

Dans l'objectif de la conception de l'Instrumentarium, l'une de nos tâches principales consiste à élaborer une telle vision des modèles CORDIS-ANIMA. La méthode systémique, qui aborde de façon générale n'importe quel objet d'étude comme un système constitué de composants de nature bien définie, s'impose presque d'elle-même comme le cadre idéal pour aborder cette question. En effet, la systémique décrit tout système, sous son aspect structurel, comme un ensemble doté d'une *frontière*, constitué *d'éléments*, de *relations* entre ces éléments et de *réservoirs* (de matière, d'énergie, d'information, etc.) [Durand 2002]. On peut immédiatement identifier un modèle CORDIS-ANIMA comme un tel système. Ses éléments sont les modules <MAT> et ses relations les modules <LIA>. Les réservoirs correspondent aux modules <MAT> dotés d'une énergie potentielle – élastique, dans la majorité des cas. Quant à la frontière, deux cas se présentent :

- Pour les modèles GENESIS, qui sont totalement isolés en cours de simulation, la frontière se situe au niveau des modules de sortie (SOX ou SOF), seule interface avec « l'environnement ».
- Dans d'autres applications, les modèles CORDIS-ANIMA ont une interaction avec un milieu extérieur en cours de simulation, la frontière est donc différente. Pour les modèles simulés en temps réel avec interaction gestuelle, on peut la situer à la fois dans le monde réel (en considérant que l'interface utilisée, voire le couple utilisateur+interface, font partie du système) et dans le monde virtuel (au niveau des entrées et sorties liant le modèle à d'autres composants logiciels).

Cependant, dans le cadre de nos travaux, il n'est pas intéressant de se représenter un modèle CORDIS-ANIMA comme un système à un niveau aussi élémentaire. Le fait de considérer chaque module indépendamment ne permet pas de parvenir à une compréhension globale de l'organisation et du comportement du modèle.

Il nous faut donc, dans un premier temps, identifier dans les réseaux CORDIS-ANIMA des constituants de plus haut niveau que les modules de base, constituants qui seront les éléments d'une nouvelle représentation de ces réseaux en tant que systèmes. L'approche systémique nous conduit, d'une certaine manière, à *modéliser* les modèles eux-mêmes[49], c'est-à-dire à les considérer à un plus haut niveau d'abstraction que celui de leurs éléments les plus simples.

[49] La systémique est d'ailleurs, d'après Jean-Louis Le Moigne, une théorie de la modélisation, et non une théorie des systèmes en eux-mêmes [Le Moigne 1994].

1. Constituants d'un modèle

Dans cette section, nous définissons les concepts permettant de décomposer un modèle en différentes parties appartenant à des catégories fondamentales clairement définies. Le « vocabulaire » ainsi introduit servira de base à tous nos développements ultérieurs. Le travail d'élaboration de ces catégories correspond à une première analyse, très générale et située au niveau neutre, de l'organisation des modèles GENESIS.

1.1. Les sous-modèles

Un *sous-modèle* est une partie d'un modèle qui n'interagit pas avec les autres parties de celui-ci – on dit qu'elle est « isolée ». Par conséquent, un sous-modèle simulé seul (par exemple en le copiant dans un autre fichier) a exactement le même comportement que dans le modèle complet. Réciproquement, les autres parties du modèle conservent leur comportement si le sous-modèle est retiré.

Il existe deux types de sous-modèles :

- *Sous-modèle explicite* : aucune interaction (module <LIA>) ne relie le sous-modèle et les autres parties. Un sous-modèle explicite correspond à une composante connexe du graphe associé au modèle.
- *Sous-modèle implicite* : la partie considérée est isolée, à l'exception d'un ou plusieurs modules immobiles (SOL ou SOF) qu'elle partage avec le reste du modèle. Dans ce cas, il n'y a effectivement aucune interaction entre le sous-modèle et les autres parties puisqu'un module immobile ne permet aucun échange énergétique. On peut alors transformer le modèle de façon à se ramener à un sous-modèle explicite : il suffit de dupliquer les modules SOL ou SOF partagés en conservant leurs positions et de reconnecter toutes les interactions concernées du sous-modèle aux duplicatas (Figure 21).

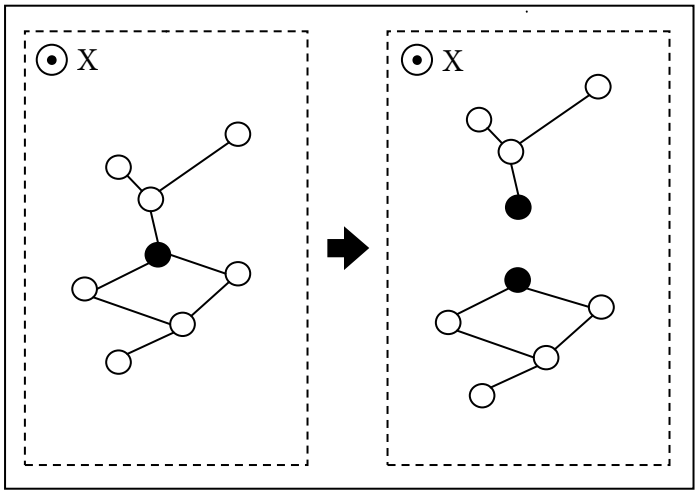


Figure 21 : Transformation d'un sous-modèle implicite en un sous-modèle explicite

On peut ajouter à ces deux situations celle où seule une interaction négligeable existe entre différentes parties d'un modèle. Le seul exemple courant de cette configuration est celui où plusieurs parties, par ailleurs strictement isolées, sont écoutées à l'aide d'une **Oreille*** commune. Cette dernière est un objet mobile, des échanges énergétiques extrêmement faibles peuvent donc avoir lieu par son intermédiaire.

Dans la plupart des cas, ces échanges n'ont aucun effet sensible et on peut effectivement considérer les deux parties comme des sous-modèles.

Au niveau neutre, un sous-modèle peut être complètement étudié indépendamment du modèle dans lequel il est plongé ; cette notion permet donc de simplifier la tâche d'analyse des modèles complexes. Au niveau poïétique, au contraire, un sous-modèle a bien évidemment des relations relevant du domaine musical avec les autres parties du modèle, puisque sa production sonore s'ajoute à celle de l'ensemble du modèle.

1.2. Points d'attache et points de butée

Un point d'attache est un module <MAT> lié par une interaction élastique permanente à une partie d'un modèle par rapport à laquelle il est fixe ou quasiment fixe, quelle que soit l'ampleur des mouvements de celle-ci. La partie attachée est globalement contrainte, au cours de la simulation, à rester dans un certain voisinage du point d'attache, voisinage d'autant plus petit que l'interaction de « fixation » est forte.

Il existe trois types de points d'attache :

- les modules SOL et SOF qui sont, par définition, immobiles ;
- les modules MAS d'inertie très supérieure à l'inertie totale de la partie attachée ;
- les Chevalets.

Dans le deuxième cas, le point d'attache peut être mis en mouvement par ses conditions initiales ou par une force extérieure, mais ses mouvements ne sont pas affectés par ceux de la partie attachée ; ils se situent, en général, dans le domaine macro-temporel. Le cas du Chevalet est plus particulier, puisque qu'il s'agit d'une Cellule dont les mouvements dépendent directement de ceux de la partie attachée (cf. Annexe 2, Section 3). Cependant, ces mouvements ont une amplitude nettement inférieure à celle de la partie attachée, et ils restent centrés sur la position du point d'attache de la Cellule elle-même.

La situation où un module MAS ($\mathcal{M}_1$) est lié à un module SOL ou à un autre module MAS de très grande inertie ($\mathcal{M}_2$) par une liaison BUT (ou, plus rarement, par une liaison LNL à élasticité non permanente) se rapproche du cas du point d'attache, mais elle a des caractéristiques particulières. En effet, étant donné que l'interaction n'est pas permanente, on ne peut pas, à proprement parler, considérer que $\mathcal{M}_1$ est « attaché » à $\mathcal{M}_2$; la plupart du temps, on observe que $\mathcal{M}_1$ rebondit contre $\mathcal{M}_2$, le rebond étant d'autant plus « dur » que la raideur de la liaison BUT est élevée. On qualifiera alors $\mathcal{M}_2$ de *point de butée*.

Deux points de butée situés à des positions différentes, peuvent être utilisés pour contraindre un ensemble de modules MAS à rester dans une zone délimitée. Ils forment alors une « boîte » virtuelle dans laquelle les modules MAS sont enfermés – ils sont en réalité plus ou moins libres d'en sortir selon la raideur de l'interaction avec les points de butée.

1.3. Les structures

1.3.1. Première définition

Une *structure* est une partie d'un modèle qu'on peut appréhender en soi comme un objet matériel, c'est-à-dire comme une « chose solide, […], une et indépendante, ayant une identité propre » [TLFi – « Objet »]. Il s'agit d'un ensemble de modules ayant une certaine cohésion, ce qui signifie en particulier que :

- l'énergie se propage librement en son sein : un apport d'énergie provoque donc la mise en mouvement de tous ses modules <MAT>, à des degrés divers selon l'inertie de chacun ;
- tous les modules <MAT> sont reliés par des interactions élastiques, qui rendent impossible « l'éclatement » de la structure (c'est-à-dire le fait que certains modules s'éloignent indéfiniment des autres). Ces interactions doivent donc correspondre à une attraction (cf. p. 76).

De plus, une structure présente un caractère élémentaire : elle n'est pas constituée de sous-parties indépendantes, liées par des interactions permanentes ou quasi-permanentes très faibles par rapport aux interactions internes de chaque sous-partie ou par des interactions élastiques ponctuelles.

La notion de structure provient de celle de « structure vibrante », utilisée dans l'étude des instruments réels et reprise dans la classification Brutel. Elle en est une généralisation, puisqu'aucune précision n'est donnée sur le rôle de la structure dans le modèle. Elle peut donc effectivement correspondre à une structure vibrante, mais aussi, entre autres, à un résonateur ou à un objet dont les mouvements sont situés dans le domaine macro-temporel. De fait, les « Environnements », les « Instrumentistes » et les « Chefs » de la classification Brutel sont tous des structures dans notre typologie.

1.3.2. Approche formelle

Il est possible de formuler un certain nombre de conditions précises portant sur une partie P d'un modèle qui doivent nécessairement être remplies pour qu'on puisse la considérer comme une structure :

[1] P est une partie connexe.
[2] P n'est pas constituée de sous-parties ayant seulement en commun des points d'attache.
[3] Tout module <MAT> de P est connecté à un autre module <MAT> de P par un module <LIA> correspondant à une interaction attractive.
[4] Pour tout module <LIA> de P, les modules <MAT> qui lui sont connectés font aussi partie de P.
[5] Les interactions élastiques entre P et le reste du modèle sont limitées aux deux types suivants :
  [5.1] des interactions permanentes ou quasi-permanentes dont la raideur est d'un ordre de grandeur inférieur aux interactions internes à P ;
  [5.2] des interactions ponctuelles de raideur quelconque.

Ces conditions sont nécessaires pour que P soit considérée comme une structure, mais pas suffisantes. Elles ne couvrent en effet que la première partie de la définition ; les contraintes relatives au caractère élémentaire d'une structure, plus délicates à décrire de façon formelle, seront abordées dans le paragraphe 1.3.4.

Examinons maintenant en quoi ces conditions concourent à la définition d'un « objet ».

La condition [1] assure que la partie P correspond à *un seul* objet, et non à plusieurs fragments sans lien entre eux. La condition [2] va dans le même sens : si deux parties d'une modèle n'ont aucune interaction entre elles et ont seulement en commun leurs points d'attaches (cf. Figure 22), on doit les considérer comme deux objets indépendants car l'énergie ne peut pas se propager de l'un à l'autre (ou seulement de façon très limitée lorsque ces points d'attache sont des Chevalets). L'un peut donc être en mouvement tandis que l'autre est au repos.

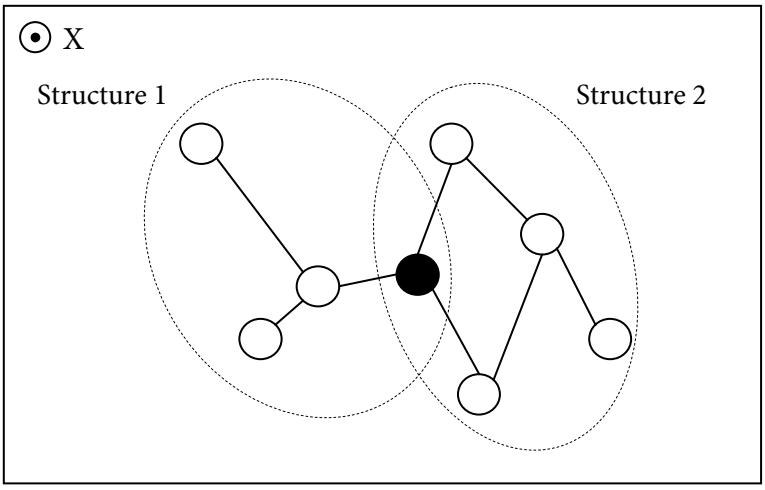


Figure 22 : Deux structures partageant un point d'attache

La condition [3] précise que la partie considérée est constituée de modules <MAT> tous liés entre eux par des liaisons élastiques. Ces modules sont donc – dans des proportions dépendant de la raideur de ces liaisons – solidaires les uns des autres ; de ce fait, tout mouvement imposé à l'un des modules <MAT> va se propager, même de façon limitée, à l'ensemble de la structure : on peut alors parler d'objet « solide ».[50] En outre, la présence de liaisons élastiques sous-entend l'existence d'un *état d'équilibre* de la structure, vers lequel elle tend spontanément lorsqu'elle est isolée, et, par opposition, *d'états déformés* dans lesquels elle ne peut rester. Cette propriété, qui n'apparait pas pour des réseaux comportant uniquement des liaisons visqueuses, est une condition nécessaire pour que la structure soit le siège de phénomènes oscillatoires.

La condition [4] exclut, d'une part, que la structure soit un simple module <LIA> : on ne peut pas, en effet, appréhender une interaction comme un objet physique. Elle impose, d'autre part, que la structure soit « complète », dans le sens où tous ses modules <LIA> sont connectés avec des modules de la structure elle-même. Il serait en effet contradictoire de considérer comme « ayant une identité propre » une partie d'un modèle comportant un module « Blanc », car l'effet de cette liaison ne pourrait pas être déterminé. Ajoutons que le module SOX, qui est de type <LIA> « dégénéré », n'est pas considéré comme faisant partie d'une structure car il n'exerce aucune force.

Enfin, la condition [5] stipule que P n'est pas une sous-partie d'une structure plus vaste, en précisant que ses interactions avec le reste du modèle ne sont pas de même nature que ses interactions internes. Elles sont soit sensiblement plus faibles (condition [5.1]), ce qui correspond aux interactions unidirectionnelles ou de couplage, soit uniquement ponctuelles (condition [5.2]), ce qui signifie qu'elles représentent une action extérieure exercée sur la structure, par exemple une excitation ou une déformation. Dans les deux cas, ces interactions ne sont pas *constituantes* de la structure et n'influent pas de façon décisive ou permanente sur ses propriétés. Cette dernière condition achève de donner à la structure son statut de « chose […] ayant une identité propre ».

1.3.3. Exemple

Soit un modèle composé (Figure 23-a) :

[50] Il est important que *tous* les modules <MAT> de la partie soient connectés à au moins une liaison élastique pour qu'on puisse parler de structure. Un module <MAT> qui ne serait connecté que par une liaison visqueuse ne pourrait pas, en effet, être considéré comme faisant partie de celle-ci, car l'interaction de frottement n'assure pas la cohésion physique.

- d'un **Chapelet*** de 6 modules MAS, attaché à ses extrémités à des modules SOL et dont tous les modules MAS et REF sont identiques,
- d'un Percuteur élémentaire,
- d'un module SOX connecté à l'un des modules MAS du Chapelet.

Les paramètres sont tels que la fréquence fondamentale du Chapelet est située dans le domaine audible, il s'agit donc d'une Corde. Le Percuteur entre en collision une seule fois avec le Chapelet à un instant quelconque de la simulation ; le module $\mathcal{M}_P$ « rebondit » contre ce dernier puis s'éloigne indéfiniment.

On définit les trois parties suivantes du modèle :

- P1, constituée de 2 modules MAS situés au milieu du chapelet et des trois modules REF qui leur sont connectés ;
- P2, constituée de l'ensemble du Chapelet, à l'exception de ses points d'attache et des deux modules REF correspondant ;
- P3, constituée de l'ensemble du Chapelet, points d'attache inclus.

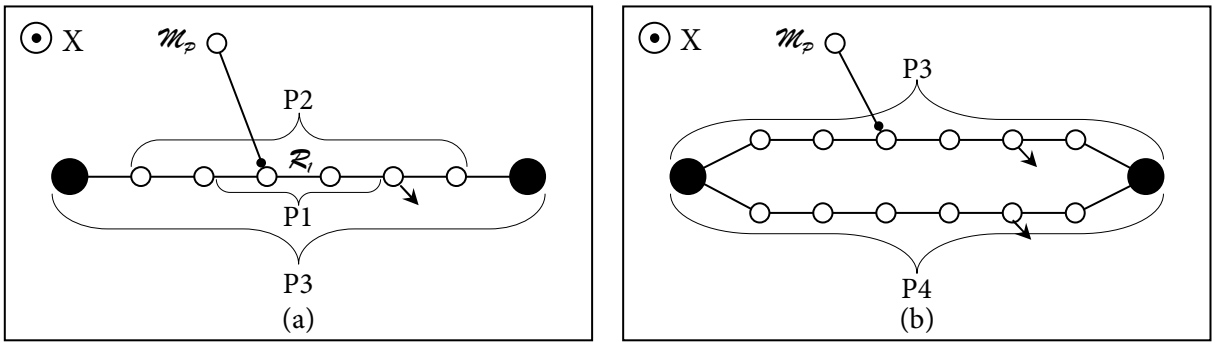


Figure 23 : Modèles de Cordes percutées. (a) Version initiale. (b) Après duplication de la Corde.

P1 et P2 ne sont pas des structures. P1 ne satisfait que les trois premières conditions : elle comporte deux modules <LIA> dont l'un des points L n'est pas connecté (contradiction avec la condition [4]) et, de plus, ces modules sont identiques à ses interactions internes (contradiction avec la condition [5]). P2, quant à elle, satisfait toutes les conditions à l'exception de la dernière : les deux interactions qui la relient aux modules SOL sont en effet identiques à ses interactions internes. Il est donc clair qu'elle est une sous-partie d'une structure, en l'occurrence P3.[51] La seule interaction que celle-ci a avec le reste du modèle est une liaison élastique ponctuelle, correspondant à la collision avec le Percuteur, qui ne s'active qu'une seule fois au cours de la simulation : la condition [5] est donc respectée (cas [5.2]).

Dupliquons maintenant le Chapelet, en conservant les mêmes points d'attache (Figure 23-b). La partie ainsi créée (P4) est une nouvelle structure, indépendante de P3, car les seuls modules qu'elles partagent sont des points d'attache (condition [3]). Ceux-ci étant immobiles, l'excitation de P3 par percussion n'a aucun effet sur P4 : ces deux parties ne sont donc pas « solidaires ».

1.3.4. Caractère élémentaire et homogénéité

L'ensemble formé par la structure P3 et le Percuteur n'est pas une structure. En effet, il n'y a aucune cohésion entre ces deux parties, puisque le module $\mathcal{M}_P$ s'éloigne indéfiniment du Chapelet après leur

[51] Notons que dans une variante du modèle à laquelle on aurait retiré les points d'attache, P2 serait considérée comme une structure à part entière. On peut dire que le réseau CORDIS-ANIMA correspondant à P2 est une structure « dans l'absolu », mais pas dans le contexte du modèle pris ici en exemple.

collision. C'est là une première illustration du caractère élémentaire des structures. Notons d'ailleurs qu'un module MAS seul, tel que $\mathcal{M}_P$, est la structure la plus simple qui soit ; il répond en effet à toutes les conditions énoncées ci-dessus, et son caractère élémentaire est évident.

Considérons une nouvelle version du modèle de la Figure 23-a, dans laquelle l'un des modules REF de P3 ($\mathcal{R}_l$) est doté d'un coefficient de raideur 10^6 fois inférieur à celui des autres modules REF. En réalisant cette modification, qui consiste à introduire une forte hétérogénéité dans les paramètres de raideur, on sépare P3 en deux sous-parties. Celles-ci ne sont pas, à proprement parler, indépendantes, puisqu'une liaison élastique permanente les relie. Cependant, cette interaction est si faible par rapport aux autres qu'elle ne peut transmettre qu'une quantité d'énergie très limitées. Après que la partie de gauche a été percutée, celle de droite est bien mise en mouvement par l'intermédiaire de $\mathcal{R}_l$, mais l'amplitude de ses oscillations sera considérablement plus faible que celles de la partie gauche. En d'autres termes, les deux sous-parties ne sont plus réellement solidaires, et on doit donc les considérer comme deux structures indépendantes couplées par une interaction plus faible que leurs interactions internes (condition [5.1]). P3 a ainsi perdu son caractère élémentaire par l'introduction d'une forte hétérogénéité des paramètres.

On peut également introduire une hétérogénéité au niveau de la nature même des interactions, par exemple en remplaçant le module $\mathcal{R}_l$ par un module BUT ayant les mêmes coefficients d'élasticité et de viscosité que les modules REF et un seuil nul. Là encore, cette modification sépare P3 en deux sous-parties, qui sont reliées par une interaction élastique non permanente. Cependant, cette interaction n'est pas ponctuelle car, une fois la partie gauche mise en mouvement, les extrémités de chaque sous-partie ($\mathcal{M}_A$ et $\mathcal{M}_B$) vont se percuter continuellement au cours de la simulation[52], avec une fréquence d'occurrence située dans le domaine audible. $\mathcal{R}_l$ est donc une interaction quasi-permanente. Ainsi, si on considère chaque sous-partie indépendamment, la condition [5.2] n'est pas respectée. Par ailleurs, les collisions ont une intensité suffisante pour donner au bout d'un certain temps à la partie droite une amplitude d'oscillation du même ordre de grandeur que celle de la partie gauche : tous les modules MAS de P3 sont encore solidaires. On peut donc toujours considérer P3 comme une structure – bien que celle-ci ait un comportement très différent de celui qu'elle avait dans la première version du modèle.

De façon générale, le caractère élémentaire des structures se traduit par une certaine homogénéité au niveau de leurs paramètres d'inertie et d'élasticité – et non nécessairement au niveau de la nature des modules, comme le démontre l'exemple ci-dessus – et ce pour des raisons pragmatiques. En effet :

- si un module <MAT> d'une structure a une inertie nettement plus élevée que la somme des inerties des autres modules <MAT>, il va se comporter comme un point d'attache vis-à-vis de la structure en question : on peut donc, à la limite, le remplacer par un module SOL.
- si une interaction élastique a une raideur beaucoup plus petite que celle des autres modules <LIA> (comme c'est le cas ci-dessus), son action peut être négligeable dans le comportement de la structure : on peut donc, à la limite, la supprimer.

Cette homogénéité est cependant relative. Il est tout à fait possible qu'une structure présente un rapport de l'ordre 10, voire 100, entre l'inertie la plus forte et l'inertie la plus faible de ses modules <MAT> ; il en est de même en ce qui concerne la raideur. Seules des hétérogénéités plus fortes

[52] Ceci résulte du fait que les deux modules SOL du modèle sont situés à la même position, ce qui implique que les sous parties de P3 oscillent toutes les deux autour de la même position d'équilibre. Les deux extrémités sont donc nécessairement amenées à se croiser (et donc à se percuter) très fréquemment.

(rapports de l'ordre de 10^3 et au-delà) sont contradictoires avec le caractère élémentaire d'une structure et indiquent plutôt la présence de plusieurs structures.

L'homogénéité des paramètres physiques entraîne logiquement une homogénéités des grandeurs physiques dynamiques : les modules <MAT> d'une structure ont en effet des fréquences d'oscillation et des amplitudes de mouvement d'un même ordre de grandeur – des rapports de l'ordre de 10 entre les valeurs minimales et maximales étant là encore envisageables.

1.4. Les composants

1.4.1. Définition

Un *composant* est une partie d'un modèle qui réalise une fonction clairement identifiée. Il peut s'agir :

- d'un module <MAT> ou <LIA> seul ;
- d'une structure ;
- d'un ensemble de modules, incluant une ou plusieurs structures.

Les composants qui ne sont pas des structures ne peuvent pas être appréhendés directement comme des objets matériels. Par exemple, la Liaison piège est un composant constitué d'un seul module LNL qui permet de lier temporairement deux modules <MAT> ; elle n'a pas d'interprétation physique immédiate et on doit faire appel à une métaphore (« colle », « aimant », …) pour en donner une description faisant référence aux objets réels. Par ailleurs, un composant n'est pas nécessairement une partie connexe d'un modèle : il peut être constitué de plusieurs « sous-composants » n'interagissant pas les uns avec les autres.

Dans l'absolu, un objet CORDIS-ANIMA quelconque ne peut être considéré comme un composant que dans un contexte précis, c'est-à-dire au sein d'un modèle, car il n'a de fonction que selon ses relations avec d'autres composants. Cependant, on pourra qualifier de composant un objet isolé contenu dans un fichier, pourvu que le nom de ce dernier, tenant lieu de contexte, précise sa fonction potentielle. Ainsi, dans la librairie de modèles fournie avec la version 1.6 de GENESIS, un certain nombre de fichiers contiennent des objets simples qui correspondent à des composants courants, comme le Percuteur élémentaire. Ces objets sont explicitement destinés à servir d'exemple ou à être importés dans d'autres modèles pour y remplir la fonction suggérée par le nom du fichier – même si rien n'empêche l'utilisateur de les mettre en œuvre d'une façon différente de celle prévue à l'origine.

La notion de fonction étant au cœur de notre conception de l'Instrumentarium, les composants vont également y occuper une place centrale, comme nous le verrons dans le chapitre suivant.

1.4.2. Exemples

Reprenons le modèle représenté dans la Figure 23-a pour illustrer les trois types de composant que nous venons de citer :

- La partie P3 est le composant central du modèle ; il s'agit, comme nos l'avons dit, d'une structure. Sa fonction consiste à produire des vibrations acoustiques après qu'elle a été excitée.
- Le Percuteur est un composant constitué d'une structure élémentaire (le module $\mathcal{M}_P$) et d'un module BUT. Sa fonction est d'exciter P3 par percussion. Cet exemple montre que, contrairement aux structures, un composant peut comporter des modules « blancs ».

- Le module SOX fixé au Chapelet est un composant constitué d'un seul module <LIA>. Sa fonction est la captation du mouvement du module auquel il est fixé, afin de produire le son résultant de la simulation.

1.5. Les modèles en tant que systèmes

Les constituants des modèles que nous venons d'identifier nous permettent d'aborder l'analyse de la modélisation à un niveau d'abstraction supérieur à celui ne faisant intervenir que les modules élémentaires. On peut alors reprendre de façon plus efficace la représentation des modèles en tant que systèmes. Nous envisagerons désormais tout modèle comme un système, vu selon deux aspects complémentaires (Figure 24) :

- Sous l'aspect structurel, le système est un ensemble constitué de *structures* en interaction, les notions de frontière et de réservoirs restant identiques à celles que nous avons définies précédemment.[53]
- Sous l'aspect fonctionnel, le système apparaît comme un ensemble de composants en relation.

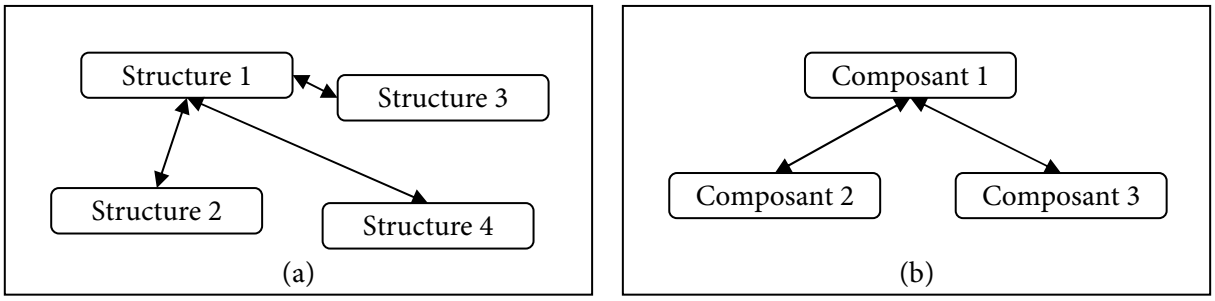


Figure 24 : Approche systémique des modèles GENESIS. (a) Aspect structurel. (b) Aspect fonctionnel.

Ces deux aspects ne coïncident pas complètement car, comme nous l'avons vu, les concepts de structure et de composant ne sont pas identiques. De plus, tandis que l'interaction entre deux structures est nécessairement physique, réalisée par un ensemble de modules <LIA>, la relation entre deux composants n'est pas de cette nature. Un exemple simple est la relation entre le composant Corde et le composant SOX du modèle étudié ci-dessus. Il n'y a pas d'interaction physique entre eux, puisque le module SOX n'exerce aucune force. De même, le Percuteur n'interagit pas, à proprement parler, avec la Corde : il *inclut* une interaction (le module BUT). C'est la structure $\mathcal{M}_P$ qui interagit avec la structure Corde. En toute rigueur, on devrait tout simplement dire que deux composants sont *connectés*, et que les fonctions qu'ils réalisent sont *composées* (cf. Chapitre 7, Section 1). Cependant, dans la pratique, il nous arrivera très souvent de dire que deux composants « sont en interaction », ce qui ne pose pas de problème dans la pratique, dès lors que la distinction fondamentale entre l'aspect structurel et l'aspect fonctionnel des modèles a été correctement établie.

Nous n'irons pas plus loin dans l'approche des modèles selon le point de vue systémique. Nous l'avons simplement utilisé afin de doter notre étude de la modélisation d'un cadre général. Nous n'aborderons donc pas les concepts plus complexes, tels que la conservation, l'évolution ou l'autorégulation, qui sont

[53] Bien entendu, cette nouvelle représentation n'empêche pas de considérer au besoin une structure comme une partie composite, c'est-à-dire comme un sous-système de l'ensemble. Toutefois, le caractère élémentaire des structures permet souvent de se « contenter » d'une approche globale de celles-ci. On dispose par exemple, grâce à la fonction « Analyse/Accordage », des outils permettant de caractériser complètement les propriétés de n'importe quelle structure ne comportant que des interactions linéaires, sans avoir à étudier séparément chaque module qui la compose.

plus pertinents pour des systèmes autrement plus complexes que les modèles CORDIS-ANIMA, comme les systèmes vivants ou sociaux. Contrairement à eux, les modèles musicaux CORDIS-ANIMA ne sont que des systèmes statiques, au sens structurel et fonctionnel : les éléments et les relations sont conservés tout au long de la simulation, car aucun module ne peut être crée ou détruit. Au final, les deux seuls concepts centraux de la systémique auxquels nous nous intéresserons tout au long de ce document sont l'*organisation* et l'*interaction*.[54]

2. Classification des structures

A partir des aspects élémentaires des modèles GENESIS que nous venons de définir et des différents types d'interactions que nous avons identifiées au Chapitre 1, il nous est possible d'établir une classification des structures. Elle relève d'une approche non hiérarchique, similaire à celles que nous avons vues dans le Chapitre 2 : elle est basée sur l'utilisation de différents critères de classification non exclusifs. Une classification hiérarchique est impraticable dans ce contexte, car elle comprendrait un nombre de niveaux et de sous-catégories beaucoup trop élevé étant donné les possibilités combinatoires de tous les critères.

2.1. Attache et mobilité

Une structure est dite *libre* si elle ne comporte aucun point d'attache, et *attachée* dans le cas contraire.

On nommera *structure mobile* une structure ayant un *mouvement d'ensemble* pendant tout ou partie de la simulation. Un mouvement d'ensemble un mouvement qui concerne (éventuellement à des degrés divers) tous les modules <MAT> mobiles de la structure et qui se caractérise par un déplacement significatif du centre de gravité de celle-ci.[55] Le mouvement d'ensemble se distingue donc des *oscillations internes* de la structure, c'est-à-dire des mouvements de chaque module MAS ou CEL par rapport à ses voisins ou par rapport à son centre de gravité. Une structure dont le centre de gravité est quasiment immobile – ce qu'on peut caractériser par le fait que l'amplitude de ses mouvements est d'un ordre de grandeur inférieur à l'amplitude des oscillations internes – est dite *stationnaire*.

Prenons comme illustration un Chapelet libre composé de N modules MAS ayant tous la même vitesse initiale V0 non nulle et la même position initiale X0. En l'absence de toute interaction avec un autre objet, tous les modules vont, au cours de la simulation, s'éloigner de leur position initiale à la même vitesse ; le Chapelet va se déplacer dans son ensemble sans que les modules MAS n'aient de mouvement les uns par rapport aux autres. En revanche, si on donne une position initiale différente de X0 à l'un des modules MAS, le Chapelet ne sera pas en position d'équilibre au début de la simulation, ce qui va produire des oscillations internes. Dans le même temps, l'ensemble des modules (et donc le centre de gravité) vont se déplacer à une vitesse moyenne égale à V0. Dans ce cas, les mouvements relatifs des modules, dus au déséquilibre initial, se superposent au mouvement d'ensemble qui correspond à une composante continue.

[54] Il nous semble très probable qu'une étude complète des modèles CORDIS-ANIMA selon la méthode systémique ait un intérêt scientifique, mais ce travail est étranger à nos objectifs directs qui, rappelons-le, ont avant tout une portée pratique et doivent aboutir à des outils d'aide à l'apprentissage et à la création.

[55] Remarquons qu'il est possible dans GENESIS de connaître la position du centre de gravité d'un ensemble de modules MAS grâce à un composant de Métrologie spécifique (cf. Chapitre 6, p. 207).

Les structures mobiles sont souvent des structures libres, mais il peut aussi s'agir de structures attachées dont au moins l'un des points d'attache à un mouvement de grande amplitude.[56] Le mouvement d'ensemble peut être une translation uniforme, comme dans l'exemple ci-dessus, ou un mouvement plus complexe, éventuellement oscillatoire.

Lorsque le mouvement d'ensemble est macro-temporel et que les oscillations internes sont des vibrations acoustiques, il est nécessaire d'utiliser une technique de captation adaptée afin d'écouter la structure (cf. Section 5.3.3).

2.2. Bande passante

On nomme *structure acoustique* une structure dont au moins l'un des modules mobiles (MAS ou CEL) a un mouvement oscillatoire comportant des composantes audibles – la fréquence fondamentale pouvant ne pas l'être. On pourra dire, plus simplement, qu'elle est le siège de vibrations acoustiques. Comme nous le verrons plus loin dans ce chapitre (cf. Section 5.2), certaines structures sont acoustiques de par leurs propriétés intrinsèques (leurs modes de vibration sont bien définis et situés dans le domaine audible) tandis que d'autres ne le sont qu'en fonction de l'intensité de l'excitation qui leur est appliquée.

Par opposition une structure sera dite *macro-temporelle* si aucun de ses modules mobiles n'a de mouvement oscillatoire comportant des composantes situées dans le domaine acoustique. Deux situations peuvent alors se présenter :

- les modules mobiles de la structure n'ont pas un mouvement oscillatoire : c'est le cas, par exemple, du module MAS d'un Percuteur élémentaire ;
- les modules mobiles de la structure ont un mouvement oscillatoire dont les composantes sont situées dans le domaine macro-temporel.

L'expression *structure acoustique* remplace celle de *structure vibrante* qui était auparavant utilisée. Celle-ci était trop générale dans le contexte de CORDIS-ANIMA, dont les modèles « regorgent » de structures vibrantes, qu'elles soient acoustiques ou macro-temporelles. Nous n'adoptons pas non plus le terme de *structure sonore*, car celui-ci impliquerait d'une certaine manière que les vibrations de la structure en question sont écoutées, ce qui n'est pas nécessairement le cas.

2.3. Type d'élasticité

Le critère suivant est le type des interactions élastiques qui composent les structures : il se divise lui-même en trois sous-critères indépendants, basés sur des caractéristiques que nous avons définies au Chapitre 1 (p. 75) :

1. Elasticité linéaire / non linéaire
2. Elasticité permanente / quasi-permanente[57]
3. Interaction attractive / répulsive – ce qui se traduit, pour les modules RES, REF et BUT par un coefficient de viscosité K positif dans le premier cas et négatif dans le deuxième.

[56] Dans le cas où une partie des points d'attache sont immobiles, le mouvement d'ensemble n'a bien sûr pas le même effet sur tous les modules : il affecte plus ceux situés près des points mobiles que ceux situés près des points immobiles.

[57] Notre définition des structures ne laisse pas la possibilité pour qu'elles contiennent des interactions élastiques ponctuelles.

Rappelons que toutes les structures linéaires sont à élasticité permanente, la réciproque n'étant pas vraie.

Il est possible, comme nous l'avons déjà vu, qu'une structure ne soit pas homogène au niveau des interactions élastiques qui la composent ; cela est vrai pour n'importe lequel des trois critères ci-dessus. De façon générale on parlera de structure à élasticité linéaire (respectivement à élasticité permanente) si et seulement si tous ses modules <LIA> élastiques ou viscoélastiques correspondent à une interaction linéaire (resp. permanente). Par exemple, un Chapelet de modules MAS reliés par des modules REF est une structure linéaire ; mais il devient une structure *non linéaire à élasticité quasi-permanente* si on y introduit un module BUT (cf. § 1.3.4).

Ajoutons, par ailleurs, que les structures à interaction répulsive sont extrêmement rares, puisqu'elles ont naturellement tendance à conduire à la divergence de la simulation.

Les structures à élasticité linéaire peuvent être caractérisées de façon simple par les propriétés de leurs modes de vibration (déformée modale, fréquence d'oscillation, temps d'amortissement). Ce n'est pas le cas pour les structures non linéaires : celles-ci ont également des modes de vibration, mais les propriétés de ces derniers varient en cours de simulation – ils dépendent, en particulier, de l'amplitude d'oscillation. Les outils permettant d'analyser certaines de ces structures (particulièrement celles à élasticité permanente) existent, mais ils n'ont pas encore été utilisés dans le contexte de GENESIS. Dans la pratique, on se réfère alors surtout à l'écoute et à l'observation visuelle de la simulation lorsqu'on travaille avec des structures non linéaires.

Il existe un type de structures non linéaires à élasticité quasi-permanentes très couramment utilisées dans GENESIS, particulièrement en tant que structures acoustiques génératrices de sons bruités : les structures « maracassées ». Il s'agit de structures attachées dont toutes les interactions sont des modules BUT élastiques ou viscoélastiques, orientés de façon à ce que les modules MAS de la structure soient tous « pris au piège » entre les points d'attaches et se percutent les uns les autres. La figure ci-dessous montre par exemple un Chapelet « maracassé ».

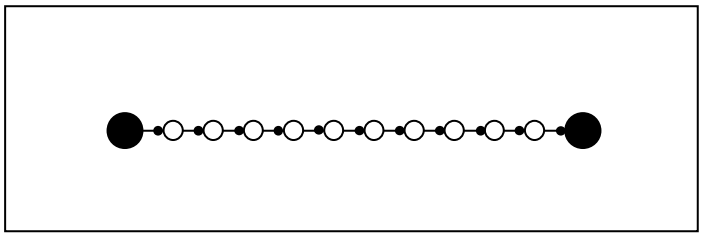


Figure 25 : Un Chapelet "maracassé"

Le nom de ce type de structures provient bien entendu des maracas ; on peut en effet les voir comme des « boîtes » contenant un certain nombre de grains (les modules MAS) qui s'entrechoquent, comme dans les maracas réels.[58] Le module BUT a généralement un seuil nul (S = 0), mais on peut jouer sur ce paramètre pour obtenir des sons plus ou moins bruités et granuleux. Dans le cas d'une structure maracassée acoustique, il est également intéressant de faire varier la position des points de butée, ce qui entraîne une évolution du timbre, qui peut passer d'un timbre harmonique à un timbre très granuleux sans hauteur identifiable.

[58] La métaphore s'arrête cependant assez rapidement, car dans le cas des maracas réels, c'est la collision entre les grains contenus et la « conteneur » qui produit le son, ce qui n'est pas nécessairement le cas avec les structures maracassées GENESIS.

2.4. Type de viscosité

On peut distinguer les structures en fonction du type de leurs interactions visqueuses.[59] Deux critères sont identifiables :

1. Le signe du coefficient de viscosité Z. S'il est positif, l'interaction entraîne un amortissement de la structure ; s'il est négatif, il y a au contraire excitation.
2. La linéarité de l'interaction. Seul le module LNL permet de réaliser des interactions visqueuses non linéaires.

Comme nous l'avons déjà souligné, les structures à viscosité négative subissent un gain d'énergie exponentiel dès qu'elles sont mises en mouvement. Pour les utiliser, il faut donc avoir recours à un mécanisme d'amortissement externe permettant d'absorber (de façon ponctuelle ou continue) cet excédent d'énergie, qui entraîne autrement la divergence de la simulation.

Notons enfin que les structures à viscosité non linéaire ne sont utilisées que de façon très exceptionnelle, leur pertinence n'ayant pas encore été montrée.

2.5. Topologie

Les structures peuvent être classifiées en fonction de leur topologie. Cependant, cette classification est difficile à réaliser de façon formelle, car il faudrait pour cela disposer d'une représentation générale de toutes les topologies possibles. Une telle représentation est peut être réalisable, par exemple à l'aide des outils de la Topologie mathématique, mais une investigation reste à réaliser pour le déterminer réellement. Il est cependant douteux qu'elle soit suffisamment simple pour être utilisée dans un contexte de création, les problèmes de topologie étant « réputés » pour leur complexité et leur caractère peu intuitif.

A l'heure actuelle, on ne peut donc donner qu'une classification basée sur des exemples. Les types de structures les plus utilisés sont, très naturellement, ceux que la fonctionnalité « Générer » de GENESIS permet de créer : « Chapelets », « Anneaux », « Membranes », « Cylindres » et « Spirales ».

Chaque topologie induit évidemment des modes de vibration spécifiques, qui se traduisent par des timbres reconnaissables lorsqu'il s'agit de structures acoustiques. Les Chapelets sont ainsi particulièrement importants car ils permettent de produire facilement des sons harmoniques, contrairement aux autres types de structures.

2.6. Homogénéité des paramètres

Enfin, on peut différencier les structures en fonction de l'homogénéité des paramètres de leurs modules. On distinguera les structures totalement homogènes des structures hétérogènes (en inertie, en élasticité ou en viscosité).

Pour les structures acoustiques, l'hétérogénéité des paramètres d'inertie ou d'élasticité tend à conférer à leur timbre un caractère inharmonique. Par exemple, la Corde produit un timbre quasi-harmonique

[59] La plupart du temps, les interactions élastiques et visqueuses sont intégrées au sein d'un même module, ce qui n'empêche pas de les considérer séparément.

lorsque elle est totalement homogène[60], et un timbre inharmonique si on introduit une hétérogénéité inertielle ou élastique.

3. Les échelles

A un niveau élémentaire, on peut regrouper les structures en fonction de critères basés sur les paramètres physiques et comportementaux les plus simples, en faisant appel à la notion d'*échelle*. Celle-ci est centrale dans la création de modèles musicaux CORDIS-ANIMA, car la différenciation des échelles entre les structures est, comme nous le verrons (cf. Chapitre 7, Section 2), l'un des principaux moyens d'organiser et de hiérarchiser les composants d'un modèle pour aboutir à la production de structures musicales complexes.

La notion d'échelle est multiple, car elle peut se rapporter à l'une ou l'autre des grandeurs physiques mises en jeu dans un modèle. Lors de la création de modèles GENESIS, l'utilisateur manipule principalement les trois échelles suivantes :

- L'échelle d'inertie, relative à l'inertie des composants ;
- L'échelle fréquentielle, relative à la fréquence des mouvements simulés et aux constantes de temps des composants ;
- L'échelle d'amplitude, relative à l'amplitude des mouvements simulés.

On peut également considérer les échelles de raideur, de viscosité ou de vitesse, même si elles sont moins centrales dans le processus de création.

Le fait que ces échelles soient définissables pour les structures découle de l'homogénéité des paramètres. Une partie fortement hétérogène d'un modèle n'a pas, en effet, un comportement suffisamment uniforme pour que la notion d'échelle soit pertinente.

3.1. L'échelle d'inertie

L'échelle d'inertie d'une structure est la plage de valeurs des inerties de ses modules <MAT>. C'est une propriété intrinsèque et statique : elle ne dépend aucunement de la simulation. L'énergie cinétique d'un module <MAT> étant proportionnelle à son inertie, l'échelle d'inertie conditionne les échanges énergétiques entre structures. De façon générale, plus une structure à une inertie élevée et moins elle est influencée par ses interactions avec d'autres structures. Lorsque les différences d'échelles sont très importantes, on peut même considérer que cette influence est négligeable : la quantité d'énergie que la structure d'échelle supérieure transmet à celle d'échelle inférieure représente généralement une infime partie de l'énergie totale de la première, tandis qu'elle peut représenter la totalité de l'énergie de la seconde. Ce type de situations complètement dissymétriques est très fréquent dans les modèles GENESIS, comme nous le verrons tout au long de notre étude.

3.2. L'échelle fréquentielle

L'échelle fréquentielle d'une structure est définie par les fréquences d'oscillation de ses modules MAS et CEL ; on ne parle pas seulement ici de la fréquence fondamentale (qui n'est d'ailleurs pas définie pour toutes les structures), mais de toutes les composantes fréquentielles du mouvement de chaque module <MAT>.

[60] Plus précisément, son timbre est quasi-harmonique, en raison de la nature discrète des modèles. Plus on se rapproche d'un cas « continu », c'est-à-dire plus le nombre de modules MAS est élevé, et plus le timbre est harmonique.

La fréquence étant une caractéristique du mouvement, l'échelle fréquentielle est une propriété dynamique d'un modèle : elle apparaît lors de la simulation. Cependant, il est possible pour les structures linéaires, ainsi que pour certaines structures non linéaires, de déterminer *a priori* leur échelle fréquentielle, en fonctions de leurs seuls paramètres (et à conditions qu'elles ne soient pas soumises à des oscillations forcées au cours de la simulation). Pour les structures linéaires, par exemple, il suffit d'utiliser l'outil « Analyse/Accorder » de GENESIS pour connaître les fréquences de tous ses modes de vibration.

Dans ces cas simples, l'échelle fréquentielle dépend directement du rapport entre l'échelle des raideurs internes de la structure et son échelle d'inertie : pour une échelle d'inertie donnée, plus les raideurs sont importantes et plus les fréquences sont élevées. On peut résumer, de façon informelle, cette relation par « l'équation » suivante :

Echelle temporelle ≈ √(Echelle des raideurs / Echelle d'inertie)

Il suffit alors de connaître deux de ces échelles pour pouvoir en estimer la troisième. Il s'agit d'un résultat général dérivé de l'étude de l'oscillateur le plus simple, la Cellule ; en effet, la fréquence propre de celle-ci (F_C) peut être exprimée, de façon approchée et pour un faible coefficient d'amortissement, par la relation suivante :

$$F_C = \frac{F_e}{2\pi}\sqrt{\frac{K_C}{M_C}}$$

où F_e est la fréquence d'échantillonnage, K_C le coefficient de raideur de la Cellule et M_C son inertie. On observe dans cette équation que la fréquence propre est proportionnelle à la racine carrée du rapport entre la raideur et l'inertie.

De façon générale, pour les structures à élasticité permanente ou quasi-permanente, leurs fréquences d'oscillations sont d'autant plus élevées que leur échelle de raideur est grande.

Il existe deux échelles temporelles principales, que nous avons déjà évoquées : l'échelle macro-temporelle et l'échelle acoustique. Notons qu'une structure peut se trouver « à cheval » entre ces deux échelles, si une partie de ses modes de vibration est située dans le domaine macro-temporel et une autre partie dans le domaine acoustique. Bien entendu, chacune de ces deux échelles peut être à son tour subdivisée. Par exemple, l'échelle macro-temporelle est composée de *l'échelle gestuelle*, qui englobe tous les mouvements situés à des fréquences du domaine des gestes humains, et de *l'échelle « sub-gestuelle »* à laquelle appartiennent tous les mouvements oscillatoires plus lents et les mouvements non oscillatoires.

3.3. L'échelle d'amplitude

L'échelle d'amplitude d'une structure correspond à l'amplitude maximale des mouvements de ses modules <MAT> au cours de la simulation. Elle ne peut être connue qu'en simulant le modèle, ce n'est donc pas une propriété intrinsèque.

Il existe une relation informelle entre les échelles d'amplitude, de vitesse et temporelle :

Echelle fréquentielle ≈ Echelle de vitesse / Echelle d'amplitude

Ici encore, le cas de la Cellule sert de référence. Il est en effet évident qu'un oscillateur a, à fréquence fixée, une vitesse maximale d'autant plus grande que son amplitude d'oscillation est importante.

L'échelle des vitesses d'une structure est moins pertinente pour l'utilisateur que les deux autres, car elle n'a pas directement d'effet sensible, tandis que l'amplitude est directement liée au volume et la fréquence à la hauteur. Dans GENESIS, on s'intéresse plutôt aux vitesses de modules <MAT> individuels (principalement lorsqu'on travaille sur les conditions initiales) qu'aux échelles de vitesse des structures.

4. Types d'interactions entre structures

Nous avons, à ce stade de notre analyse, une connaissance plus approfondie des structures qu'on peut trouver dans un modèle GENESIS. Il est maintenant temps d'aborder la question des relations entre ces structures. Comme nous l'avons déjà dit, ces relations sont des interactions physiques, réalisées par des modules <LIA>. Nous allons dans cette section identifier les différents types possibles d'interactions entre deux structures, notamment en fonction du rapport de leurs échelles d'inertie. Nous considérerons uniquement les interactions constituées d'un seul module <LIA>, car il est relativement direct de généraliser les résultats que nous allons exposer aux situations mettant en jeu plusieurs liaisons. De plus, nous nous focaliserons sur les interactions élastiques ou viscoélastiques. Les cas où deux structures sont uniquement reliées par une interaction visqueuse sont peu courants et correspondent à des techniques de modélisation particulières (il s'agit, par exemple, de l'Amortissement externe –cf. Section 5.4 de ce chapitre – ou de l'excitation par frottement – cf. Chapitre 6, Section 1) : ils sortent donc du cadre d'une étude générale des modèles.

Nous examinerons dans la suite de cette section un modèle composé de deux structures S_1 et S_2, reliée par un module <LIA> $\mathcal{L}$ (de raideur $K_R \neq 0$ et de viscosité Z_R) connecté au module $\mathcal{M}_1$ de S_1 et au module $\mathcal{M}_2$ de S_2 (Figure 26). On considère que les deux structures sont au repos au début de la simulation et que l'une ou l'autre est mise en mouvement à un instant t_0, par un moyen d'excitation quelconque.

Soulignons que les considérations qui suivent concernent l'étude de deux structures quelconques. Il ne s'agit donc pas de résultats analytiques, inaccessibles dans un cas général (particulièrement en raison du fait que les structures peuvent ne pas être linéaires), mais de résultats empiriques, qui relèvent également du « sens commun » - il n'y a par exemple rien d'étonnant à ce que l'action d'une structure de faible inertie sur une structure de très forte inertie soit pratiquement sans effet sur cette dernière. La situation de référence pour l'étude des relations entre deux structures est aussi la plus simple : il s'agit de l'interaction viscoélastique linéaire entre deux Cellules, qu'il est possible d'analyser et de caractériser complètement.

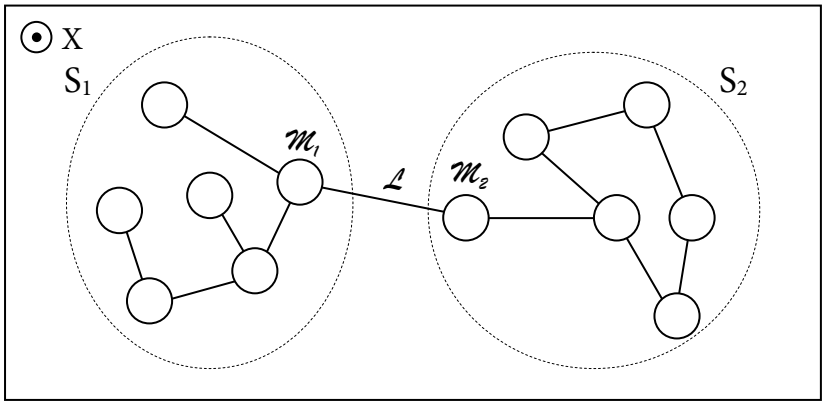


Figure 26 : Modèle général d'interaction entre deux structures S_1 et S_2

4.1. Interactions entre structures d'échelles différentes

On se place ici dans le cas où les deux structures appartiennent à des échelles d'inertie largement différentes : les modules <MAT> de S_1 ont une inertie de l'ordre de 10^6, et ceux de S_2 une inertie de l'ordre de 1. Dans ces conditions, pour que le modèle soit stable au cours de la simulation, les valeurs de K_R et des coefficients de raideur internes de S_2 ne doivent pas excéder l'inertie du module $\mathcal{M}_2$.[61]

En raison de la dissymétrie des échelles d'inertie, le comportement d'un tel modèle est complètement différent selon que S_1 ou S_2 est excitée.

Si S_1 est excitée, son mouvement n'est quasiment pas entravé par son interaction avec S_2 – à moins que celle-ci ait une inertie totale de l'ordre de 10^6, ce qui suppose qu'elle soit composée d'environ 10^6 modules MAS ou CEL. S_2 est donc excitée à son tour par S_1 via le module $\mathcal{L}$. Son amplitude d'oscillation va dépendre du coefficient K_R. S'il est du même ordre de grandeur que les raideurs internes de S_2, l'amplitude de S_2 sera de la même échelle que celle de S_1. Plus K_R est petit est plus l'amplitude de S_2 sera faible.

Etant donné que S_1 n'est quasiment pas perturbée par l'interaction $\mathcal{L}$, on est ici dans la situation d'une interaction « unidirectionnelle », cas de figure qui sera développé ci-dessous (cf. Section 4.3).

En revanche, si S_2 est excitée, l'inertie de $\mathcal{M}_2$ est tellement petite par rapport à celle de $\mathcal{M}_1$ que la quantité d'énergie transmise à S_1 est quasiment négligeable. L'amplitude d'oscillation de S_1 sera donc extrêmement faible par rapport à celle de S_2. Il est clair que cette configuration est de peu d'utilité si le but est simplement de transmettre un mouvement de S_2 à S_1 : un cas comparable dans le monde réel consisterait par exemple à faire tirer un charriot par un attelage de souris ! En réalité, cette configuration n'a d'intérêt que si on considère $\mathcal{M}_1$ comme un point d'attache de la structure S_2, et que les deux structures sont excitées. On peut de cette façon « étirer » S_2 en déplaçant $\mathcal{M}_1$, ce qui peut permettre de faire varier ses propriétés dynamiquement s'il s'agit d'une structure non linéaire (cf. p. 203).

Moins la différence entre les échelles d'inertie des structures est importante et plus la situation se « symétrise ». Dans le premier cas (excitation de S_1), la quantité d'énergie transmise par S_1 à S_2 représente une proportion de plus en plus importante de son énergie initiale. Dans le deuxième cas (excitation de S_2), l'amplitude des oscillations de S_1 se rapproche progressivement de celle de S_2. Finalement, lorsque les échelles d'inertie deviennent comparables, on doit envisager l'interaction entre les deux structures d'une autre façon : le facteur décisif est alors la raideur du module $\mathcal{L}$.

4.2. Le couplage

4.2.1. Définition

Dans l'absolu, on peut parler de *couplage mécanique* à propos de n'importe quelle interaction entre deux modules <MAT>. En ce sens, le couplage est présent dans la totalité des modèles : il est au cœur même de CORDIS-ANIMA.

Toutefois, dans la terminologie GENESIS, le terme *couplage* est utilisé dans un sens plus précis. Nous le définissons comme une interaction permanente ou quasi-permanente entre deux structures indépendantes situées à la même échelle d'inertie et dont la raideur est de l'ordre de dix à cent fois plus faible que la plus petite des interactions internes de ces structures.

[61] Il s'agit là d'une contrainte empirique, qui peut être raffinée dans chaque cas particulier. Elle provient de l'étude de la convergence du module CEL (cf. p. 70)

Dans cette définition prédomine l'idée d'une interaction faible, mais non négligeable, entre des objets de « même nature » – il est d'ailleurs fréquent de coupler des structures très similaires, voire identiques. Ces objets conservent leur « identité » tout en s'influençant mutuellement : en d'autres termes, le résultat d'un couplage n'est pas une nouvelle structure à part entière, mais une composition qui conserve en partie les propriétés individuelles des structures couplées. Il est clair que cette définition est relative et dépend en partie de l'observateur du modèle : il n'existe pas de critère totalement objectif et général pour déterminer si une structure « reste elle-même » lorsqu'elle couplée à une autre. On doit donc considérer avant tout le couplage au niveau poiétique, en tant que méthode de composition de structures basée sur les règles simples que nous avons énoncées ci-dessus.

Cependant, comme nous le faisons dans l'exemple ci-dessous, on pourra se baser sur l'analyse des modes de vibration pour examiner les situations de couplage élastique de structures linéaires. On comparera les modes de vibration de chaque structure prise individuellement à ceux de l'ensemble formé par les deux structures en interaction. On parlera de couplage si les modes de départ sont partiellement conservés dans les modes d'arrivée. Dans le cas de structures acoustiques, une autre façon de procéder consiste tout simplement à écouter les structures avec et sans couplage, afin de déterminer l'influence de celui-ci sur les sons produits. On parlera de couplage seulement si les transformations sonores induites par l'interaction $\mathcal{I}$ sont limitées et que les caractéristiques propres de chaque structure restent discernables ; dans le cas contraire, on considérera que les deux structures ainsi reliées en forment une nouvelle.

Le couplage donne lieu à des échanges d'énergie dans les deux sens entre les structures couplées ; on peut par exemple produire de cette façon des battements (cf. Chapitre 5, Section 3.4.1) dus aux allers-retours de l'énergie entre deux structures identiques. Il est important de noter que le couplage a des effets d'autant moins importants que les structures ont des modes de vibration distincts. Les échanges d'énergie se produisent en effet par le biais de phénomènes de résonnance. Ainsi, si les modes de vibration ne se correspondent pas et que seule l'une des deux structures est excitée, l'autre ne gagnera qu'une faible amplitude de vibration par rapport à la première.

Il n'entre pas dans nos objectifs de réaliser une description complète du couplage, qui pourrait occuper à elle-seule une partie entière de ce document étant donné la complexité et la richesse du sujet (en particulier si on prend en compte les couplages visqueux, que nous n'aborderons pas ici). Des études poussées ont déjà été réalisées [Couroussé 2003 ; Kontogeorgakopoulos 2008] et d'autres suivrons certainement ; elles sont nécessaires pour parvenir à une maîtrise du couplage qui ne soit pas seulement empirique, particulièrement en ce qui concerne le couplage par des interactions non linéaires.

4.2.2. Exemple

Illustrons la situation de couplage par un modèle très simple (Figure 27) constitué de deux modules CEL $\mathcal{C}_1$ et $\mathcal{C}_2$, dont les paramètres et les propriétés sont donnés dans le Tableau 6.

Dans un premier temps, les deux Cellules sont liées par un module RES de raideur K=0,0001 (soit une raideur 100 fois plus faible que celle de la raideur minimale des deux Cellules). Commençons par signaler qu'il s'agit typiquement ici d'un « mauvais » couplage, car les fréquences propres des Cellules sont très éloignées : l'énergie se transmettra donc mal de l'une à l'autre. Ce modèle n'est potentiellement intéressant que si les *deux* cellules sont excitées. Si seule $\mathcal{C}_1$ est excitée, $\mathcal{C}_2$ aura en effet une amplitude maximale environ 50 fois plus petite que la première.

	$\mathcal{C}_1$	$\mathcal{C}_2$
M	1	1
K	0,01	0,02
Z	0,0001	0,0001
Fréquence propre (F)	702,184 Hz	993,453 Hz

Tableau 6 : Paramètres et propriétés de deux modules CEL non couplés

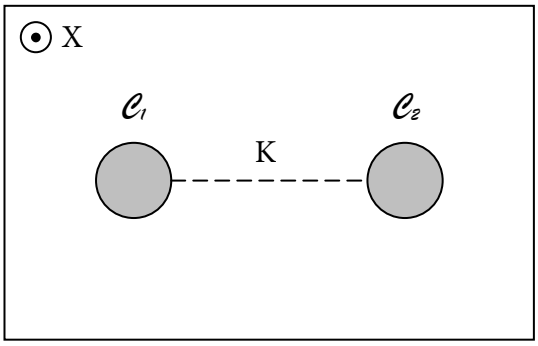


Figure 27 : Deux modules CEL couplés par un module RES

La « macrostructure » qu'on obtient par ce couplage a deux modes de vibration dont les fréquences sont F_1 = 705,671 Hz et F_2 = 995,987 Hz. Ces valeurs sont très proches de celles des fréquences propres des Cellules indépendantes (l'augmentation est largement inférieure à un seizième de ton dans les deux cas). Il est donc tout à fait possible de considérer les Cellules ainsi reliées comme deux structures indépendantes ayant une influence réciproque. On dira qu'elles sont couplées.

Si on donne au module de couplage une raideur égale à la raideur minimale des Cellules (K=0,01), on obtient une structure dont les modes de vibration ont les fréquences suivantes : F_1 = 825,6 Hz et F_2 = 1337,16 Hz. Celles-ci ne correspondent plus du tout aux fréquences propres des Cellules indépendantes : il y a une différence de près de 1,5 tons pour F_1 et 2,5 tons pour F_2. On voit ici que les deux Cellules connectées forment une nouvelle structure, car leurs propriétés individuelles ne sont pas conservées au sein du nouvel ensemble.

4.3. Les interactions unidirectionnelles

Une interaction élastique $\mathcal{L}$ entre deux structures S_1 et S_2, S_1 étant la structure excitée, est dite *unidirectionnelle* si ses effets sont négligeables sur S_1 et non négligeables sur S_2. Une telle interaction se présente dans deux situations :

- Soit S_1 appartient à une échelle d'inertie nettement supérieure à celle de S_2. C'est le cas que nous avons déjà vu dans la Section 4.1.
- Soit S_1 et S_2 ont la même échelle d'inertie et la raideur de l'interaction $\mathcal{L}$ est très inférieure aux raideurs internes de S_1.

Le terme « unidirectionnelle » est évidemment un abus de langage puisque toutes les interactions sont par principe bidirectionnelles dans CORDIS-ANIMA. La notion de direction se rapporte ici au sens de transmission de l'énergie. En effet, le fait que l'interaction soit négligeable du point de vue de S_1 implique que la quantité d'énergie qu'elle perd au profit de S_2 est très petite par rapport à son énergie totale. On peut donc considérer S_1 comme une source « inépuisable » d'énergie qu'elle transmet à S_2.[62] Cette dernière étant initialement au repos, elle reçoit toute son énergie de S_1 via $\mathcal{L}$; du point de vue de S_2, l'énergie reçue n'est donc pas négligeable.

[62] En réalité, si S_2 est une structure amortie ou que $\mathcal{L}$ est une interaction viscoélastique, l'énergie de S_1 fini nécessairement par s'épuiser complètement au bout d'un certain temps. Mais ce temps d'amortissement peut être extrêmement long par rapport à la durée de la simulation (de l'ordre de plusieurs heures, voire plus). Cet amortissement ne sera donc pas observable au cours de la simulation.

Dans le cas où S_1 se réduit à un seul module <MAT> $\mathcal{M}_1$, $\mathcal{L}$ sera considérée comme unidirectionnelle si, sur la durée de la simulation, son action n'a pas pour effet une variation observable de la vitesse de $\mathcal{M}_1$.

Les interactions unidirectionnelles sont utilisées dans de nombreuses situations, comme nous le verrons tout au long de la suite de ce document. Elles permettent par exemple de réaliser un « contrôle » de position dans le cas où S_1 a une échelle d'inertie très supérieure à S_2 : lorsque $\mathcal{L}$ a un coefficient de raideur maximal et que sa viscosité est suffisamment importante pour empêcher l'oscillation du système $\mathcal{M}_1$+$\mathcal{R}$+$\mathcal{M}_2$, $\mathcal{M}_2$ suit très précisément le mouvement de $\mathcal{M}_1$ sans que ce dernier ne soit perturbé.

5. Les fonctions fondamentales

En préalable à l'analyse approfondie des modèles GENESIS que nous effectuerons dans les chapitres suivants, il est essentiel de se pencher sur les conditions nécessaires pour qu'un modèle soit utilisable dans un contexte de création musicale. Une fois ces conditions identifiées, elles serviront de point de départ pour l'étude et la compréhension de tout modèle analysé.

La fonction essentielle d'un modèle CORDIS-ANIMA est de produire un ou plusieurs signaux qui, via un certain nombre de transformations, donneront naissance à des phénomènes physiques réels : sons, images, ou actions mécaniques. Les signaux produits avec GENESIS sont normalement destinés à être écoutés : il s'agit de signaux *sonores*, dont les fréquences sont comprises entre 20 Hz et 20 kHz environ. Il est aussi possible de produire des signaux, inaudibles, dont toutes les fréquences sont inférieures à 20 Hz. Un signal de ce type, qu'on qualifiera de *macro-temporel*, est exploitable de multiples manières, par exemple en tant que signal de force ou de position utilisé en entrée d'une autre simulation. Nous ne nous intéresserons cependant qu'à la production de signaux sonores.

Pour qu'un modèle GENESIS produise un signal sonore, trois conditions doivent absolument être réunies :

- Génération acoustique : le modèle doit contenir au moins une structure acoustique en mouvement.
- Excitation : pour que la structure acoustique se mette en mouvement, il faut qu'une certaine quantité d'énergie lui soit transmise. Etant donné qu'un modèle GENESIS est isolé, ceci implique qu'une certaine quantité d'énergie doit être présente à l'instant initial de la simulation.
- Captation des vibrations acoustiques : les vibrations de la structure acoustique doivent être captées à l'aide d'au moins un module SOX ou SOF.

En outre, il faut également être en mesurer d'*arrêter* les sons produits – à moins bien sûr que la production de sons continus soit l'objectif recherché, mais ce cas est pour le moins marginal. La présence d'un certain amortissement est donc la quatrième condition pour qu'un modèle soit utilisable pour la création musicale.

A ces quatre conditions correspondent quatre fonctions fondamentales de même nom, nécessaires au sein de tout modèle GENESIS destiné à produire des sons musicaux. L'étude de la façon dont ces fonctions sont réalisées formera désormais la base de toute analyse d'un modèle. Dans la suite de cette section, nous procédons à l'examen de chacune d'entre elles d'un point de vue général ; l'étude des composants permettant de les réaliser sera effectuée dans le Chapitre 6.

5.1. Excitation

Nous définissons l'Excitation comme l'action de transmettre de l'énergie (sous forme cinétique ou potentielle) à une structure. La source de l'énergie est le plus souvent externe à la structure, mais elle peut aussi être interne, comme dans certains cas particuliers abordés dans la Section 5.1.2.

L'excitation d'une structure acoustique est nécessaire pour qu'un modèle produise un son, mais elle peut être précédée d'autres excitations ne portant pas forcément sur une structure acoustique (cf. Section 5.1.4). Que la cible de l'excitation soit une structure acoustique ou un structure macro-temporel, la nature des mécanismes mis en jeu est fondamentalement la même et seule l'échelle des phénomènes (et par conséquent l'échelle des paramètres) change. On peut donc étudier cette fonction de façon générale, sans se préoccuper du niveau où elle se situe dans les modèles.

5.1.1. Les sources d'énergie d'initiale

L'énergie d'un modèle est présente au début de la simulation soit sous forme d'énergie potentielle (Figure 28), soit sous forme d'énergie cinétique (Figure 29). Les deux cas sont parfois combinés, y compris dans un même module.

Le cas le plus courant où l'énergie est initialement présente sous forme potentielle est celui où au moins l'un des modules <MAT> d'une structure élastique ne se situe pas à la même position que ses autres modules <MAT>. La structure n'est pas initialement dans un état d'équilibre, elle va donc se mettre en mouvement immédiatement : l'énergie potentielle est convertie en énergie cinétique dès le début de la simulation (Figure 28). Dans d'autres cas, l'énergie potentielle d'un module ne se transforme pas spontanément en énergie cinétique : une action préliminaire est nécessaire pour que cela se produise. Cette situation est comparable à celle d'un objet posé au bord d'une table : son énergie potentielle, due à la force de gravitation, ne se convertit en énergie cinétique qui si l'objet est poussé et tombe, ce qui peut ne demander qu'une dépense d'énergie minime par rapport à l'énergie mécanique de l'objet. Dans GENESIS, l'un des composants présentant cette particularité est nommé la **Gâchette***.

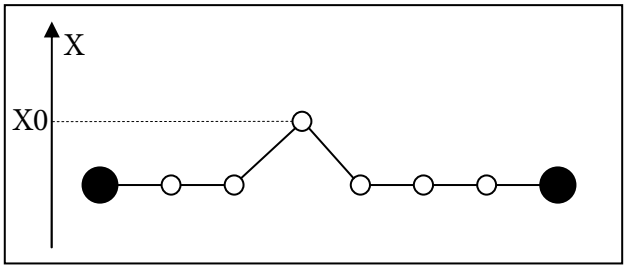


Figure 28 : Energie initiale potentielle. La conversion en énergie cinétique est spontanée, car la structure n'est pas initialement dans son état de repos.

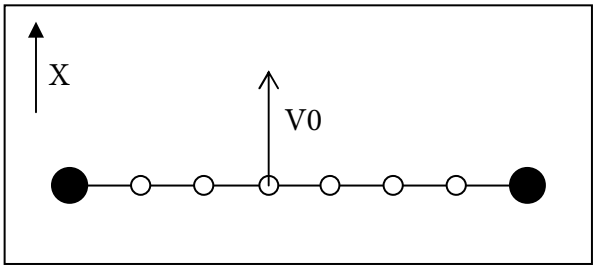


Figure 29 : Energie initiale cinétique

On appellera *module source* tout module <MAT> ayant une énergie potentielle ou cinétique non nulle au début de la simulation.

5.1.2. Apports d'énergie en cours de simulation

Normalement, le niveau d'énergie d'un modèle – qui, à l'instant initial, est égale à l'énergie des modules sources – ne peut que diminuer au cours de la simulation, ou éventuellement rester constant en l'absence de tout frottement. Cependant, il existe dans GENESIS plusieurs situations, que nous avons déjà évoquées qui créent de l'énergie *ex-nihilo* au cours de la simulation :

- Divergence
- « L'effet Thil ».
- Raideur négative
- Viscosité négative

Dans les deux premiers cas, le gain d'énergie résulte d'une perte de la cohérence physique des algorithmes de simulation pour certaines valeurs des paramètres. Dans les deux autres cas, la cohérence physique est respectée et le gain d'énergie découle « normalement » d'une simulation réalisée avec des paramètres « anormaux », qui n'existent pas dans le monde réel.

La divergence et l'effet Thil sont *a priori* des effets indésirables que l'on cherche à éviter. Cependant, ils peuvent être mis à profit en situation de création, et les moyens de les contrôler sont connus et maîtrisés, de même que pour l'élasticité et la viscosité négatives. Par exemple, le timbre très particulier de certains modèles s'explique par un phénomène de divergence contrôlée, où l'énergie produite par une partie du modèle est absorbée par une autre (cf. Annexe 4, Section 1).

Dans la suite de ce document, nous nommerons *source artificielle d'énergie* un composant qui, par l'un des quatre phénomènes que nous venons de citer, introduit de l'énergie en cours de simulation.

5.1.3. Types d'excitation

Il existe de nombreuses façons de communiquer de l'énergie à une structure, que nous pouvons catégoriser suivant les trois dimensions suivantes : la localisation de la source d'énergie par rapport à la structure excitée, la durée de l'excitation et la « fréquence » de la source d'énergie. Nous abordons ces différentes dimensions dans les trois sous-sections suivantes.

5.1.3.1 Excitation interne et externe

On parlera d'*excitation interne* lorsque la source d'énergie (qu'il s'agisse d'un module source ou d'une source artificielle) fait partie de la structure excitée, et d'*excitation externe* dans le cas contraire. Un exemple d'excitation interne est un module MAS disposant d'une vitesse initiale non nulle, ou une liaison REF dont la viscosité est négative. La forme d'excitation externe la plus courante est la percussion, mais on peut aussi citer le pincement, le frottement de type archet, ou encore l'excitation par une source artificielle comme la liaison à un module <MAT> par le biais d'un module FRO à viscosité négative.

Pour l'excitation interne, on parlera d'*excitation par position initiale* si la structure est initialement écartée de sa position d'équilibre et d'*excitation par vitesse initiale* si l'un des modules <MAT> à une vitesse initiale différente de 0. Tout modèle GENESIS comprend nécessairement une excitation par position ou vitesse initiale – la structure ainsi excité peut être un simple module MAS qui va transmettre une partie de son énergie à d'autres structures.

5.1.3.2 Excitation instantanée et continue

Comme dans le cas des instruments réels [Cadoz 1999a], il existe dans GENESIS deux types bien distincts d'excitation :

- l'*excitation instantanée*, qui se caractérise par le fait que la transmission d'énergie à la structure excitée se fait en un laps de temps très court, largement inférieur à la seconde. Dans cette situation le temps de l'excitation se termine lorsque que celui de la vibration sonore commence.
- l'*excitation continue*, pour laquelle la transmission d'énergie à lieu pendant une durée arbitrairement longue. Dans cette situation, le temps du phénomène d'excitation et celui de la vibration sonore sont en grande partie communs.

Notons qu'une succession d'excitations instantanées très rapprochées, éventuellement à une fréquence sonore, peut aboutir à un effet proche de celui d'une excitation continue. Les mécanismes à l'œuvre restent cependant clairement distincts, le principe même de l'excitation instantanée étant que l'interaction entre l'excitateur et la structure excitée n'est pas permanente.

Dans le domaine des instruments réels, l'excitation instantanée correspond principalement à la percussion et au pincement, tandis que l'excitation continue se rencontre dans tous les aérophones et les instruments à excitation par friction, notamment les cordes frottées. Ces différentes situations ont toutes un équivalent dans GENESIS. En outre, d'autres situations, impossibles ou difficilement réalisables pour les instruments réels, viennent se rajouter dans GENESIS, comme l'excitation – continue – par viscosité négative.

5.1.3.3 Excitation macro-temporelle et excitation acoustique

Considérons maintenant le cas de l'excitation externe. Il y a alors au moins une interaction liant un module $\mathcal{M}_s$ de la structure source à un module $\mathcal{M}_\ell$ de la structure cible (cf. Figure 30). On peut distinguer deux cas, selon la nature du mouvement de $\mathcal{M}_s$. Si celui-ci n'est pas oscillatoire ou s'il a une fréquence inaudible, on parlera d'*excitation macro-temporelle* ; si au contraire il est situé à une fréquence audible, on parlera d'*excitation acoustique*.

Une fois encore, ces deux types d'excitation ont un équivalent dans le monde des instruments réels. L'excitation macro-temporelle est réalisée par le *geste d'excitation* de l'instrumentiste, tandis que l'excitation acoustique se retrouve, par exemple, dans la relation entre la corde et la table de résonance, *via* le chevalet. Le geste d'excitation réel ne peut être acoustique, car aucun être humain n'est capable de produire des mouvements situés à une fréquence audible – il a d'ailleurs été remarqué que le domaine fréquentiel des gestes s'arrête là où celui de l'audition commence. Le corps humain est toutefois capable de réaliser une excitation acoustique, principalement par les trois moyens naturels que sont la voix, la vibration des lèvres, et le sifflement. Des instruments de musique sont d'ailleurs associés à ces moyens : le mirliton et instruments assimilés pour le premier, et, pour le deuxième, la famille des *tuyaux à anches naturelles* (d'après la terminologie de André Schaeffner [Schaeffner 1994]), qui comprend les Cuivres, ainsi que d'autres instruments du monde entier comme les conques, didjeridoos et autres cors.

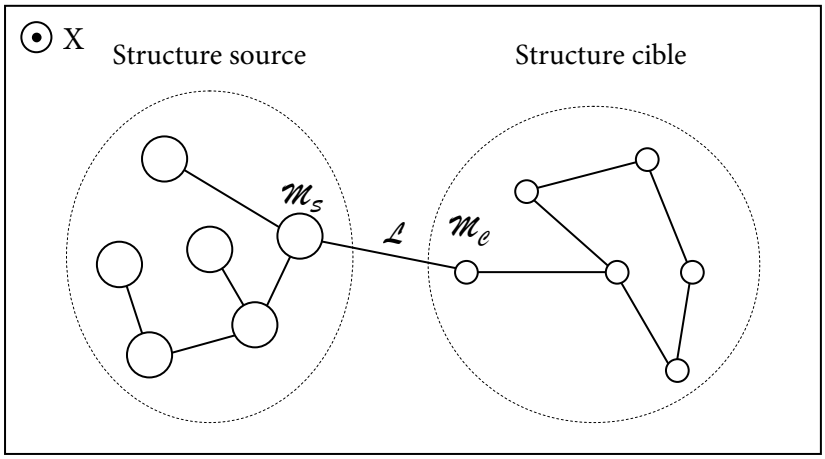


Figure 30 : Excitation macro-temporelle et excitation acoustique

Dans le monde réel, l'excitation a toujours pour but de mettre en mouvement une structure vibrante ; ce n'est pas nécessairement le cas dans GENESIS, où une structure macro-temporelle peut exciter une autre structure de même nature.

Que l'on considère les instruments réels ou les modèles GENESIS, lorsque la cible d'une excitation est une structure acoustique, il est bien connu que l'excitation macro-temporelle nécessite la présence d'une non linéarité au niveau de l'interaction entre l'excitateur et la structure acoustique. Cette interaction non linéaire permet la production d'oscillations acoustiques à partir de mouvements non oscillatoires, ou situés à des fréquences gestuelles. Cette condition est évidemment levée dans le cas de l'excitation acoustique, puisque la source d'énergie produit déjà des vibrations acoustiques ; ainsi, il est possible dans GENESIS qu'une structure acoustique en excite une deuxième par l'intermédiaire d'une liaison linéaire (RES, FRO ou REF).

5.1.4. De la source d'énergie à la structure écoutée

Pour qu'il y ait effectivement excitation, il ne suffit pas que le modèle contienne un module source, il faut bien sûr qu'une partie de l'énergie de celui-ci soit transmise à la structure acoustique écoutée. Dans le cas de l'excitation interne d'une structure acoustique, cette transmission est directe et effective dès le début de la simulation. En ce qui concerne l'excitation externe, la transmission s'effectue par une chaîne plus ou moins longue et complexe de composants. En général, les modèles à transmission directe (qui sont logiquement les plus simples à analyser) produisent un seul évènement sonore tandis que les modèles à transmission indirecte génèrent des séquences d'évènements.

La chaîne de transmission de l'énergie peut comporter des structures macro-temporelles (comme les « Chefs » et les « Instrumentistes » de la hiérarchie Brutel) ou acoustiques. La chaîne la plus simple est celle où le module source est un module MAS à vitesse initiale non nulle lié à la structure écoutée par une liaison non linéaire (typiquement, une liaison BUT). La compréhension des chaînes de transmission complexes, comprenant plusieurs niveaux intermédiaires, est l'une des principales difficultés lors de l'analyse des modèles GENESIS, d'autant plus que pour nombre d'entre eux, la transmission ne se fait simplement de façon unidirectionnelle d'un composant à l'autre. Dans ces modèles, dont les différents éléments ne sont pas organisés de façon strictement hiérarchique, une structure excitée peut restituer à celle qui l'excite une quantité non négligeable de l'énergie reçue, ce qui va perturber le comportement de cette dernière. Les phénomènes de ce type, souvent complexes à maîtriser et à analyser, se révèlent particulièrement intéressants d'un point de vue musical ; rompant l'aspect « mécanique » que peuvent avoir les modèles strictement hiérarchiques, ils apportent une

évolution dans le comportement des modèles qui évoque parfois de façon troublante l'expressivité propre à l'interprétation musicale par un instrumentiste réel.

5.1.5. Influence de la position et du mode d'excitation

Tout comme pour les instruments réels qui laissent à l'utilisateur la possibilité d'exciter la structure vibrante à différentes positions, la position d'excitation d'une structure acoustique dans GENESIS a une influence importante sur le timbre du son qui va être produit. Pour des structures simples attachées, comme les cordes et les membranes, on peut dire de façon générale qu'une excitation éloignée des points d'attache produit des sons dont les harmoniques graves ont une amplitude importante (son « rond »), au contraire d'une excitation proche des points d'attache qui favorise les harmoniques plus aigus. Il s'agit là d'un résultat général qui demande à être confirmé au cas par cas.

5.2. Génération acoustique

Toutes les structures acoustiques sont composées d'interactions élastiques, qui sont indispensables pour que des phénomènes oscillatoires aient lieu. Les conditions pour qu'une structure produise des vibrations acoustiques ne sont pas les mêmes selon que ces interactions élastiques sont linéaires ou non. Nous allons les étudier dans les deux cas.

5.2.1. Cas des structures linéaires

Le cas le plus simple est celui des structures élastiques strictement linéaires, c'est-à-dire les structures qui ne contiennent aucune liaison BUT ou LNL. Elles sont complètement analysables à l'aide de l'outil « Analyse/Accordage », qui donne la fréquence et le temps d'amortissement de chacun de leur modes de vibration à partir des expressions analytiques qui les relient aux paramètres physiques du réseau. Les conditions pour qu'une structure linéaire produise des vibrations acoustiques portent sur ses paramètres, et plus particulièrement sur le rapport entre les élasticités et les inerties (rapport K/M).

Dans la pratique, on considère souvent que les inerties sont fixées et que la variable d'ajustement pour l'accordage d'une structure est l'élasticité.[63] Pour obtenir des vibrations acoustiques, il suffit que les élasticités soient suffisamment grandes par rapport aux inerties, de sorte qu'au moins une partie des modes de vibration soit située dans le domaine audible. La façon la plus simple de procéder est d'utiliser l'outil « Analyse/Accordage » pour vérifier et éventuellement modifier l'accordage. Puisque la structure est linéaire, les modes ont la même fréquence quelle que soit l'amplitude de vibration, c'est-à-dire quelle que soit la quantité d'énergie transmise par le dispositif d'excitation. En d'autres termes, une structure linéaire peut être dite *acoustique* en fonction de ses propriétés intrinsèques seules, à l'exclusion de tout autre facteur.

5.2.2. Cas des structures non linéaires

Le cas des structures non linéaires est plus complexe : certaines peuvent aussi bien produire des vibrations acoustiques que des vibrations macro-temporelles selon la façon dont elles sont excitées, tandis que d'autres sont intrinsèquement acoustiques, de la même manière que peut l'être une structure linéaire.

[63] C'est ainsi que procède l'outil « Analyse/Accordage ». Il modifie également, mais dans une moindre mesure, les valeurs des viscosités. En effet, la viscosité a aussi une influence – bien plus limitée que l'élasticité – sur la fréquence des modes de vibration ; son effet principal concerne évidemment leur temps d'amortissement [Incerti 1996].

On ne peut pas étudier de façon générale les conditions pour qu'une structure non linéaire quelconque produise des vibrations acoustiques. Nous allons donc nous pencher sur deux exemples que nous choisissons volontairement très différents pour illustrer l'éventail de cas possibles.

5.2.2.1 Exemple 1 : les structures à élasticité en X^3

Il s'agit de structures à élasticité permanente dont les liaisons internes sont constituées de modules LNL ayant une caractéristique LNLK d'allure similaire à la fonction $f(x) = x^3$ (Figure 31) et une caractéristique LNLZ linéaire. Lorsque tous les modules LNL sont identiques, ces structures simulent les effets de tension, soit en déplaçant un ou plusieurs points d'attache, ce qui produit un glissando [Tache 2004], soit en faisant varier l'énergie communiquée lors de l'excitation (par exemple en utilisant des percuteurs lancés à différentes vitesses), ce qui permet de reproduire deux effets sonores caractéristiques de la non linéarité des cordes réelles soumises à des vibrations de forte amplitude [Castagné&Cadoz 2000] :

- glissement vers le bas de la fréquence fondamentale suite à l'excitation ;
- légère distorsion du timbre.

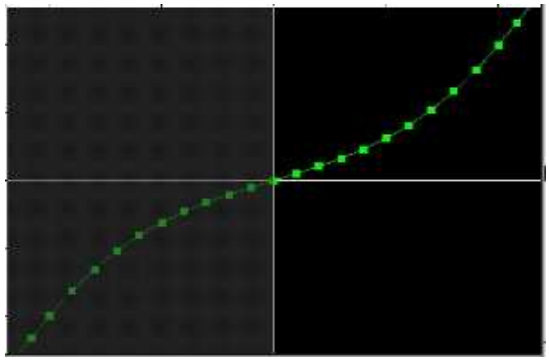


Figure 31 : Caractéristique LNLK d'un module LNL « en X^3 »

La caractéristique LNLK est composée d'un segment linéaire central. Il confère un comportement quasi-linéaire à la structure pour des oscillations de faible amplitude. Au-delà de cette zone centrale, la pente de la caractéristique, qui est égale au coefficient de raideur, augmente dans des proportions décidées par l'utilisateur. Pour qu'une telle structure produise des vibrations acoustiques, il suffit que le segment central, qui correspond à l'élasticité minimale de la liaison, ait une pente suffisante : quelle que soit l'intensité de l'excitation, la fréquence fondamentale du son produit sera nécessairement supérieure ou égale à la fréquence d'une structure linéaire ayant la même élasticité que celle du segment central.

On construit une structure de ce type en procédant de la façon suivante :

a. On commence par créer une structure linéaire, composée de liaisons REF.

b. On accorde cette structure (par exemple avec l'outil « Analyse/Accordage ») de façon à lui donner une fréquence fondamentale située dans le domaine audible. Ce sera la « fréquence de base » de la structure, c'est-à-dire celle qu'on obtiendra pour des oscillations de faible amplitude.

c. On remplace toutes les liaisons REF par des liaisons LNL, grâce à la fonction « Substituer ». Les propriétés de la structure restent pour l'instant identiques, les liaisons LNL obtenues par ce procédé étant équivalentes aux liaisons REF précédentes.

d. On modifie les liaisons LNL pour leur donner l'allure « en X^3 », en prenant soin de ne pas toucher au segment central (dont l'élasticité correspond à celle des liaisons REF initiales).

Pour des oscillations de faible amplitude, la structure finale a exactement le même comportement que la structure linéaire obtenue à l'étape b, tandis que pour des oscillations plus fortes, les effets de la non linéarité se font sentir.

Finalement, le cas des structures à élasticité en X^3 construites de cette façon se ramène à celui des structures à élasticité linéaire : les conditions pour la Génération acoustique portent uniquement sur les paramètres des interactions internes.

On peut toutefois construire des variantes de ces structures pour lesquelles l'intensité de l'excitation conditionne la nature, acoustique ou macro-temporelle, des vibrations produites. Il suffit par exemple de suivre les étapes ci-dessus, mais en donnant à la structure une fréquence fondamentale inférieure au seuil d'audition à l'étape b. On obtient ainsi une structure qui produit des mouvements macro-temporels pour de faibles amplitudes d'oscillation, et des vibrations acoustiques pour des amplitudes plus élevées.

5.2.2.2 Exemple 2 : le ZIG

Le « ZIG » est une structure à élasticité non permanente, composée d'un module MAS $\mathcal{M}_1$ relié par des liaisons BUT à deux modules SOL situés à des positions différentes, de sorte que $\mathcal{M}_1$ rebondit entre ceux-ci lorsqu'il est lancé (Figure 32). Nous allons étudier ce modèle pour montrer l'influence de l'excitation sur la nature des vibrations obtenues. Nous ne s'intéresserons pas ici au moyen utilisé pour lancer $\mathcal{M}_1$.

Nous considérons un ZIG paramétré de façon à éviter l'effet Thil. La raideur des liaisons BUT est fixée à la valeur maximale – la limite étant donnée par le phénomène de divergence – afin que le temps d'interaction entre $\mathcal{M}_1$ et les SOL puisse être considéré comme négligeable.

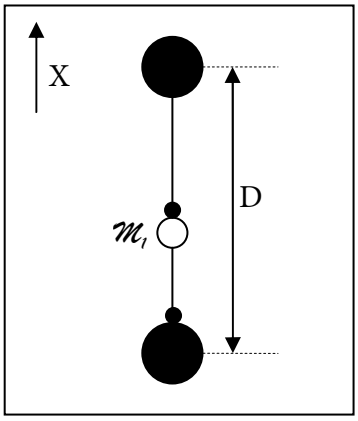


Figure 32 : Le ZIG

Dans un premier temps, nous étudions le cas où les liaisons BUT n'ont pas de viscosité (Z=0). $\mathcal{M}_1$ conserve donc sa vitesse (en valeur absolue) après chaque rebond. Avec ces paramètres, $\mathcal{M}_1$ a un mouvement oscillatoire à fréquence constante. Le signal obtenu en enregistrant ce mouvement est ce qu'on appelle couramment un signal triangulaire (Figure 33), dont on peut facilement calculer la fréquence F connaissant la vitesse V du module et la distance D entre les deux SOL. Une période du mouvement correspond à une séquence au cours de laquelle $\mathcal{M}_1$ part d'une position donnée, rebondit successivement contre les deux SOL et revient à la position de départ avec la même direction de déplacement. La distance parcourue est 2*D, et étant donné la vitesse, la durée de la période est :

$$T = 2D / V$$

Soit une fréquence d'oscillation :

$$F = 1 / T = V / 2D$$

Etant donné que D est constant au cours de la simulation, la fréquence du mouvement ne dépend que de la vitesse communiquée à $\mathcal{M}_1$ lors de l'excitation. Il est donc clair que le ZIG n'est pas intrinsèquement une structure acoustique : il peut aussi bien produire des signaux macro-temporels que des signaux sonores.

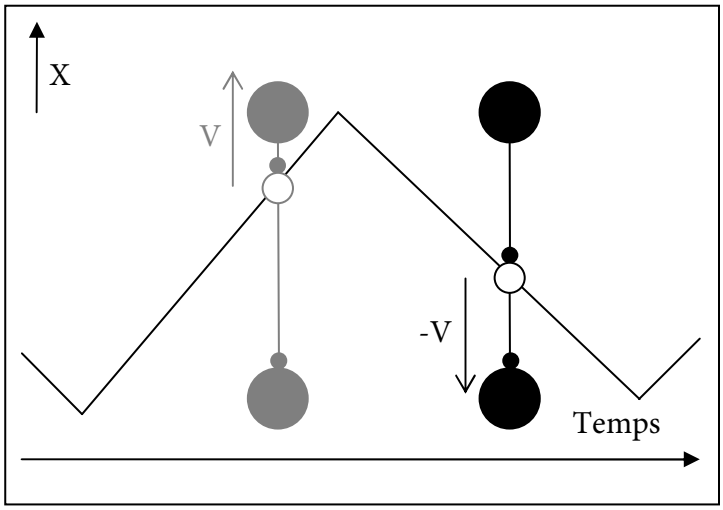


Figure 33 : Mouvement d'un ZIG non amorti, avec la représentation de deux états successifs

Plaçons-nous maintenant dans le cas où les modules BUT du ZIG ont une viscosité positive. Alors, $\mathcal{M}_1$ va progressivement perdre son l'énergie cinétique et la fréquence d'oscillation va tendre vers 0 après l'excitation initiale, passant, le cas échéant, d'une fréquence audible à une fréquence inaudible. La nature du ZIG dans ce cas est ambiguë, puisqu'il commence par agir comme une structure acoustique, pour ensuite produire un signal macro-temporel.[64]

Le cas, très simple, du ZIG est emblématique des questions qui se posent lors de l'utilisation ou de l'étude d'une structure non linéaire à élasticité non permanente. La conclusion qu'on peut en tirer est que la nature acoustique ou macro-temporelle d'une telle structure dépend aussi bien de ses propriétés intrinsèques que de l'utilisation que l'on en fait : l'excitation détermine parfois la nature du signal qui sera produit et, par conséquent, la fonction de la structure considérée dans le modèle.

5.2.3. Conclusion

Les exemples que nous avons examinés montrent que les conditions pour qu'une structure produise des vibrations acoustiques varient selon la nature de cette structure. Pour résumer, on peut retenir l'existence de trois types de structures, sachant que les frontières entre les catégories sont perméables, que tous les mélanges sont possibles et qu'aucune conclusion absolue ne saurait donc être formulée :

- Les structures à élasticité linéaire, dont la nature acoustique ou macro-temporelle ne dépend pas de l'excitation, et dont les propriétés modales sont accessibles et modifiables grâce à la fonction « Analyse/Accordage »

[64] On obtient le comportement opposé (c'est-à-dire une augmentation de la fréquence d'oscillation) en donnant une viscosité négative aux modules BUT.

- Les structures non linéaires à élasticité permanente. Certaines (Exemple 1) ont une nature intrinsèquement acoustique, tandis que d'autres produisent des vibrations acoustiques ou macro-temporelles selon l'intensité de l'excitation.
- Les structures non linéaires à élasticité non permanente, comme le ZIG, pour lesquelles la nature acoustique ou macro-temporelle des vibrations produites dépend, dans des proportions variables, de leurs paramètres et de l'intensité de l'excitation. Distinguons le cas des structures maracassées, dont on peut prévoir l'échelle fréquentielle selon la raideur de leurs modules BUT.

5.3. Captation

La fonction de captation produit un ou plusieurs signaux sonores à partir des mouvements de modules <MAT> (captation par module SOX) ou des forces exercées par des modules <LIA> (captation par module SOF) au cours de la simulation.

On considère la captation comme une action non perturbante, dans le sens où le composant qui la réalise n'altère pas – ou seulement de façon négligeable – le comportement du reste du modèle. Ainsi, le Chevalet n'est pas un composant de captation car il joue avant tout le rôle de point d'attache et fait donc partie intégrante de la structure. En revanche, l'Oreille, qui a les mêmes propriétés qu'un Chevalet mais qui est reliée à la structure écoutée par une interaction unidirectionnelle, est un composant de captation.

5.3.1. Captation par module SOF et SOX

Le signal sonore obtenu grâce au module SOX correspond exactement (à un facteur d'amplification près) au mouvement du module <MAT> auquel il est lié. Le signal obtenu grâce à un module SOF est l'enregistrement de la force exercée par le module <LIA> $\mathcal{L}_\varepsilon$ auquel il est connecté. Appelons $\mathcal{M}_\varepsilon$ le module <MAT> connecté à l'autre extrémité de ce <LIA>. Etant donné que le SOF est par définition immobile, cette force ne dépend à tout moment que de la position et de la vitesse de $\mathcal{M}_\varepsilon$; on peut donc dire que $\mathcal{M}_\varepsilon$ – et lui seul – est « écouté ». Cependant, cette écoute est indirecte car la force calculée par le module de liaison n'est pas simplement proportionnelle à la position de $\mathcal{M}_\varepsilon$. Le rapport entre le signal qu'on obtiendrait en connectant $\mathcal{M}_\varepsilon$ à un SOX (S_X) et celui qu'on obtient grâce à un SOF (S_F) dépend du type de la liaison $\mathcal{L}_\varepsilon$.

Comme souvent, les cas où $\mathcal{L}_\varepsilon$ est une liaison linéaire sont les plus simples à étudier. Nous reprenons ici les résultats démontrés dans [Kontogeorgakopoulos 2008] concernant l'effet de l'écoute par module SOF, *via* les modules RES, FRO et REF :

- $\mathcal{L}_\varepsilon$ *est un module RES* : S_F est proportionnel à S_X retardé d'un échantillon. Le coefficient de proportionnalité est égal à la raideur de $\mathcal{L}_\varepsilon$, K. Le décalage d'un échantillon n'étant pas un phénomène audible, on peut considérer que l'écoute par le composant RES+SOF est une écoute neutre, équivalente à l'écoute directe par module SOX. Elle présente cependant certaines possibilités supplémentaires, comme nous le précisons dans la Section 5.3.2.
- $\mathcal{L}_\varepsilon$ *est un module FRO* : si on considère S_X comme un signal d'entrée du composant FRO+SOF et S_F comme le signal de sortie, alors ce composant agit comme un filtre passe-haut. Le signal S_F est en effet proportionnel à S_X auquel ses plus basses fréquences (y compris une éventuelle composante continue) ont été retirées. Ces propriétés rendent ce composant intéressant pour la captation de sources mobiles (cf. Section 5.3.3).

- $\mathcal{L}_\varepsilon$ *est un module REF* : le signal S_F est la somme des signaux résultant des forces élastique et visqueuse, c'est-à-dire une combinaison linéaire de S_X avec un retard d'un échantillon et de S_X filtré dans ses basses fréquences. Cette addition de deux signaux, l'un filtré et l'autre non, ne fait pas réellement sens ; l'écoute par module REF est donc rarement utilisée.

Le cas où $\mathcal{L}_\varepsilon$ est une liaison non linéaire ne peut pas être traité de façon générale et peu de recherches ont été menées sur le sujet à ce jour. On peut cependant dire que la non linéarité implique nécessairement une forme de distorsion du signal – S_F contient des composantes spectrales qui ne sont pas présents dans S_X. On s'éloigne ainsi de la simple captation pour entrer dans le domaine du *traitement* du son. Cependant, utilisée de façon adéquate, l'écoute par des liaisons non linéaires peut également servir à réaliser une captation à gain variable (cf. Chapitre 6, Section 4).

5.3.2. Captation de sources sonores multiples

La fonction « Ecouter » de GENESIS produit un fichier sonore comportant autant de canaux qu'il y a de modules de sortie (SOX et SOF) dans le modèle simulé. Cela a bien entendu un intérêt lorsque l'on travaille sur un projet utilisant plus de deux canaux (quadriphonie, octophonie, etc.), mais ce fonctionnement complique la réalisation de la captation dans certaines situations.

Imaginons par exemple que l'on travaille sur un modèle composé de deux sous-modèles. Si on utilise un module SOX pour écouter chacun d'entre eux, la simulation produira un fichier stéréophonique, dont chaque canal correspondra au son produit par l'un des deux sous-modèles. Cette possibilité est intéressante, mais elle n'est pas générale puisqu'elle oblige à séparer complètement les sources sonores dans le rendu final. Souvent, l'utilisateur souhaitera plutôt mélanger les sons produits, qu'il s'agisse *in fine* de produire un fichier monophonique, stéréophoniques ou multicanaux.

La problématique générale illustrée par cet exemple est donc la captation de plusieurs sources sonores avec un seul module de sortie. Le module SOX est par définition incapable de la réaliser directement, il a donc fallu développer des techniques spécifiques.

5.3.2.1 Avec le module SOF

L'utilisation du module SOF est le moyen le plus simple pour réaliser cet objectif. Comme tous les modules de type <MAT>, il calcule la résultante des forces qu'il reçoit des différents modules <LIA> auxquels il est connecté. Le signal qu'il enregistre est donc la somme des signaux de force reçus. Pour écouter plusieurs sources sonores avec un module SOF – en tenant compte de la transformation nécessairement induite par ce mode de captation – on connecte donc celui-ci à chacun des modules à écouter par un module <LIA> dont les paramètres auront été correctement choisis – il faut principalement veiller à ce que l'interaction soit unidirectionnelle.

En outre, cette technique permet de réaliser le « mixage » des différentes sources écoutées, c'est-à-dire de doser l'importance de chacune d'entre elles dans le résultat final. En effet, chaque force reçue par le module SOF est proportionnelle au coefficient de raideur ou de viscosité de la liaison concernée. Pour donner plus d'importance à une source sonore par rapport à une autre, il suffit donc d'augmenter le coefficient correspondant.

5.3.2.2 Oreilles et Chevalets

Il existe deux autres moyens de réaliser la captation de sources multiples. Le premier est « l'Oreille » un composant constitué d'une **Cellule TFP*** « équipée » d'un module SOX et connectée aux différentes sources sonores de la même façon que pour l'écoute par module SOF. Cependant, l'Oreille n'est plus utilisée, car elle produit un résultat sonore rigoureusement identique à celui qu'on obtiendrait en la

remplaçant par un SOF (à l'exception du décalage d'un échantillon) tout en étant un peu plus complexe à mettre en œuvre et plus coûteuse en temps de calcul.

L'autre moyen permettant d'écouter plusieurs sources sonores est le Chevalet (cf. Annexe 2, Section 3) que nous avons déjà évoqué. Ce composant, qui réalise également un couplage des structures qui lui sont attachées, peut être connecté à un module SOX afin d'écouter les différentes structures auxquelles il sert de point d'attache. L'écoute sur Chevalet est moins générique que l'écoute par module SOF, car elle ne permet pas de choisir la position d'écoute (cf. Section 5.3.4). Elle est particulièrement intéressante dans les modèles inspirés des instruments à corde acoustiques. En effet, c'est *via* le chevalet que les cordes sont écoutées, étant donné que c'est lui qui transmet les vibrations acoustiques à la caisse de résonance.

5.3.3. Captation de structures acoustiques mobiles

Comme nous l'avons défini précédemment, les structures mobiles ont un mouvement d'ensemble, que ce soit tout au long de la simulation, ou seulement pendant une durée déterminée. Lorsque le mouvement d'ensemble est macro-temporel et a une amplitude trop importante par rapport à l'amplitude des oscillations internes de la structure, il est impossible d'écouter celle-ci en utilisant un module SOX ou un seul composant RES+SOF. En effet, dans cette situation, le mouvement du module écouté est la superposition d'un mouvement inaudible de grande amplitude et d'une oscillation acoustique d'amplitude inférieure. Le signal capté étant normalisé, il aura une composante continue ou à très basse fréquence qui prédominera largement, voire totalement, sur les fréquences audibles.

Le modèle représenté dans la Figure 34 illustre cette situation. Il est composé d'une Cellule non amortie (ensemble SOL+RES+$\mathcal{M}_1$) d'inertie $M_1=10^6$, accordée à la fréquence $F_1=1$ Hz, à laquelle est attaché un module MAS $\mathcal{M}_2$ d'inertie $M_2=1$ via une liaison RES. Celle-ci est paramétrée de façon à ce que la structure constituée des deux modules MAS reliés (qui constitue une Cellule dont le point d'attache est mobile) ait une fréquence $F_2=f$ située dans le domaine audible.

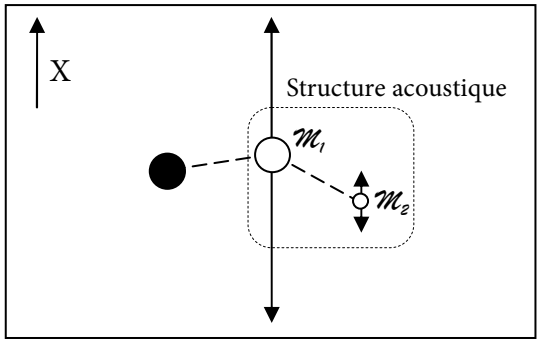


Figure 34 : Modèle avec structure acoustique mobile

Les conditions initiales suivantes donnent un rapport d'amplitude d'environ 1/100 entre le mouvement d'ensemble et les oscillations acoustiques :

	$\mathcal{M}_1$	$\mathcal{M}_2$
X0	1	1,01
V0	0	0

En enregistrant le mouvement de $\mathcal{M}_2$ avec un module SOX ou un composant RES+SOF, le signal sonore obtenu, exprimé en temps continu, sera de la forme :

$$S(t) = \sin(\pi t) + \frac{1}{100}\sin(f\pi t)$$

La composante audible du signal a ici une amplitude inférieure de 40 dB à la composante inaudible, le fichier sonore obtenu est donc quasiment inutilisable en pratique.

Le modèle ci-dessus n'est qu'un exemple dépourvu d'intérêt du point de vue de la création musicale. Cependant, les structures mobiles se révèlent intéressante, voire incontournables, dans de nombreuses situations, il est donc nécessaire de disposer des moyens permettant des les écouter. Deux techniques ont été développées dans ce but :

- L'écoute par composant FRO+SOF. Comme nous l'avons déjà vu dans la Section 5.3.1, cette technique d'écoute a pour effet de réaliser un filtrage passe-haut du mouvement du module écouté. Elle permet ainsi de supprimer toute composante continue ou à très basse fréquence, pour ne conserver que les fréquences audibles. Elle a cependant l'inconvénient d'atténuer également et de façon sensible les basses fréquences audibles ; de plus, la fréquence de coupure du « filtre » n'est pas réglable, elle ne dépend que de la fréquence d'échantillonnage. Cette technique est donc normalement réservée à l'écoute de structures acoustiques suffisamment aiguës pour que le son ne soit pas ou peu affecté par le filtrage.
- L'écoute différentielle. Cette technique, basée sur le composant RES+SOF, permet d'enregistrer la différence de position entre deux modules $\mathcal{M}_1$ et $\mathcal{M}_2$ de la structure acoustique et donc de capter uniquement ses oscillations internes. On utilise pour cela deux liaisons RES de raideur opposée (K et –K), chacune reliant le module SOF et l'un des deux modules à écouter. Si l'on suppose que le SOF est situé à la position X_0=0, la résultante des forces qu'il reçoit est :

$$\begin{aligned} F_r(n) &= -K(X_0(n) - X_1(n)) - (-K)(X_0(n) - X_2(n)) \\ &= K \cdot X_1(n) - K \cdot X_2(n) \\ &= K \cdot (X_1(n) - X_2(n)) \end{aligned}$$

  Cette force est strictement proportionnelle à la différence de position des deux modules écoutés. Le signal obtenu correspondra donc au mouvement relatif de ceux-ci, qui est indépendant du mouvement d'ensemble de la structure. Notons que si on intervertit les deux modules RES, le signal obtenu est simplement l'opposé du signal précédent, ce à quoi l'oreille est insensible ; le choix d'attribuer la raideur négative à l'un ou l'autre des modules RES est donc indifférent. La question importante pour l'utilisateur est le choix des modules écoutés, lorsque plusieurs combinaisons sont possibles, car celui-ci a une influence sur le timbre du son obtenu (cf. Section 5.3.4).

Les applications de ces deux techniques d'écoute au modèle pris en exemple ci-dessus sont représentées dans la Figure 35.

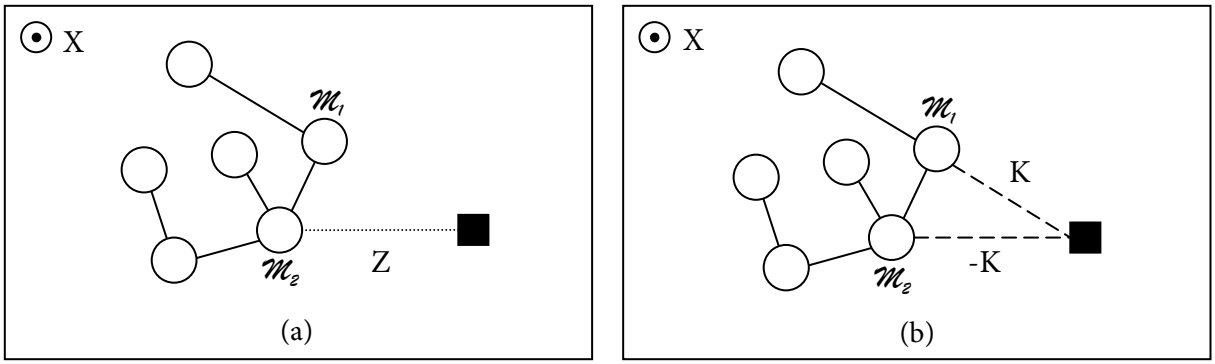


Figure 35 : Captation de structures mobiles. (a) Par composant FRO+SOF. (b) Ecoute différentielle.

5.3.4. Influence de la position d'écoute

Quel que soit le composant de captation utilisé, on a toujours le choix du module écouté pour une structure donnée. Cette « position d'écoute » a une influence déterminante sur le timbre du son recueilli, car elle peut privilégier l'écoute de certains modes de vibration au détriment de certains autres. Ce phénomène est observable sur les instruments réels. Par exemple, la plupart des guitares électriques disposent de plusieurs microphones situés à des distances différentes du chevalet, qui procurent chacun un son différent (le microphone situé près du manche donne en général un son plus « rond », c'est-à-dire plus riche en harmoniques graves, que celui situé près du chevalet).[65] Cependant, les situations ne sont pas totalement comparables du fait que, contrairement à un instrument réel, un modèle CORDIS-ANIMA est un objet discret. Cela implique que les modes de vibration et les positions d'écoute différentes sont en nombre fini. Tandis que le microphone de la guitare électrique capte le son produit par une partie conséquente de la structure acoustique, l'écoute d'un seul module d'une structure GENESIS est extrêmement sélective. Le signal produit varie parfois dans de larges proportions selon la position d'écoute, y compris pour deux modules voisins, qui peuvent correspondre à des nœuds ou des ventres de différents modes de vibration. Le plus souvent, l'écoute d'un module situé près d'un point d'attache produira un son caractérisé par un renforcement des harmoniques aiguës tandis qu'une position d'écoute éloignée des points d'attache produira un son plus rond.

Pour réaliser une captation moins sélective, plus proche du cas des instruments réels, il est possible d'écouter plusieurs modules voisins simultanément ou de réaliser une écoute sur Chevalet.

5.4. Amortissement

Les frottements sont tellement présents autour de nous que nous n'avons même pas conscience du rôle crucial qu'ils jouent dans notre vie quotidienne, nous permettant de réaliser des actions aussi élémentaires que de marcher ou de poser un objet à un endroit donné. Ils interviennent de façon fondamentale au niveau sonore, en amortissant jusqu'à l'arrêt complet les vibrations acoustiques de tous les objets sur lesquels nous agissons. Du seul point de vue de l'audition, un monde sans frottement serait déjà un véritable cauchemar, chaque son se prolongeant indéfiniment et se joignant à la cacophonie générale…

[65] Pour être exact, il faut préciser que certaines guitares disposent de microphones de types différents (à simple ou double bobinage), qui se caractérisent par des sons clairement distincts. Ce facteur vient donc se rajouter à celui de la position du microphone.

La modélisation physique permet de supprimer totalement les frottements, mais c'est une liberté dont on se passe la plupart du temps dans GENESIS lorsqu'on qu'on travaille sur les structures acoustiques. Bien sûr, le projet particulier d'un compositeur peut l'amener à travailler avec des sons non amortis. Mais, dans l'immense majorité des cas, le discours musical a besoin de l'extinction plus ou moins rapide des sons pour pouvoir exister et se développer. Du point de vue de la modélisation, ceci se traduit par la nécessaire mise en œuvre de mécanismes d'amortissement au niveau des structures acoustiques.

Il faut bien faire la différence entre les frottements qui s'appliquent aux structures acoustiques et ceux qui s'appliquent aux structures macro-temporelles d'un modèle. Une telle structure, par exemple un « bras » percutant une membrane de façon répétée, peut tout à fait être dépourvu de frottement, ce qui lui permet d'effectuer cette action aussi longtemps que voulu par l'utilisateur, éventuellement pendant toute la durée de la simulation. L'absence de tout frottement est en fait très courante dans les structures macro-temporelles.

On distingue trois types principaux d'amortissement, que nous examinons dans la suite de cette section :

- Amortissement interne
- Amortissement externe permanent
- Amortissement externe ponctuel ou étouffement

Comme nous allons le voir, chaque type d'amortissement a des propriétés particulières qui le rendent plus ou moins adapté selon les situations. L'utilisateur devra donc choisir celui ou ceux qu'il utilisera en fonction de trois critères : la durée d'amortissement, l'influence de l'amortissement sur le timbre et le besoin éventuel de n'appliquer l'amortissement qu'à partir d'un instant donné de la simulation.

5.4.1. Amortissement interne

Comme son nom l'indique, l'amortissement interne est réalisé au sein de la structure acoustique elle-même, par les interactions qui la constituent. Dans la majorité des cas, les liaisons responsables de l'amortissement sont des modules REF ou BUT.

Plus la viscosité interne d'une structure est élevée et plus l'amortissement de celle-ci est rapide après une excitation. Mais, comme l'ont montré les travaux de Djoharian concernant les structures linéaires [Djoharian 1999], le rapport entre la raideur et la viscosité interne a, dans le même temps, une influence déterminante sur le timbre de la structure. Pour une raideur donnée, augmenter la viscosité a pour effet de diminuer la brillance du son – car les modes de vibration aigus sont plus affectés que les modes graves – tout en réduisant le temps d'amortissement. Suivant la valeur de Z, une même structure pourra évoquer des sons de matériaux très différents (caoutchouc ou bois pour des valeurs élevées, métal ou verre pour des valeurs faibles).

5.4.2. Amortissement externe permanent

On parle d'amortissement externe permanent lorsqu'une structure acoustique est liée à un module immobile (SOL) ou quasi-immobile (MAS de forte inertie) par un ou plusieurs modules FRO. Ce type de liaison est ce qu'on appelle un *frottement externe*. Notons que la structure acoustique peut présenter un amortissement interne ou non.

En appliquant un frottement externe à tous les modules mobiles d'une structure acoustique, on modélise un frottement global avec un « milieu extérieur » représenté par le module SOL. Dans le cas des structures linéaires, ce frottement a un effet similaire sur chaque module MAS ou CEL,

indépendamment des modes de vibration auxquels il participe. Contrairement à ce qui se passe avec le frottement interne, une variation de l'amortissement externe conserve alors les rapports entre les temps d'amortissement des modes de vibration. L'amortissement externe agit donc principalement sur la durée totale d'amortissement et conserve dans une certaine mesure le timbre perçu.

Cet amortissement externe global a un coût algorithmique élevé puisqu'il nécessite autant de modules FRO qu'il y a de modules mobiles dans la structure acoustique. On peut réduire ce coût tout en conservant un résultat sonore comparable : il suffit pour cela de ne relier qu'une partie des modules de la structure au SOL qui représente le milieu extérieur et d'augmenter le paramètre Z en conséquence. Par exemple, si on applique le frottement externe à un module sur deux, la viscosité devra être doublée par rapport au cas où on l'applique à tous les modules afin d'obtenir une durée d'amortissement similaire.

Dans le cas des structures linéaires ou non linéaires à élasticité permanente, si le nombre de modules auxquels est appliqué un frottement externe est trop petit ou si les modules amortis ne sont répartis avec homogénéité dans la structure, le timbre risque d'être affecté. En effet, la frottement est alors appliqué localement et devient susceptible d'agir de façon différenciée sur les modes de vibration de la structure. Un exemple simple est l'application d'un frottement externe sur les modules centraux d'un chapelet de MAS, qui entraîne un amortissement plus rapide du mode fondamental au profit du deuxième mode. On voit donc que l'amortissement externe permet d'agir sur le timbre d'une structure de façon subtile, en offrant à l'utilisateur la possibilité de « cibler » – de façon certes limitée – les modes de vibration sur lesquels il souhaite agir. Cette technique a été identifiée mais n'a pas encore fait l'objet d'une étude précise.

5.4.3. Etouffement

L'étouffement est un autre cas d'amortissement externe qui, contrairement à celui que nous venons de voir, n'agit que ponctuellement au cours de la simulation. Son action est d'augmenter temporairement l'amortissement normal d'une structure acoustique, à un moment déterminé par l'utilisateur. Il peut être utilisé dans plusieurs objectifs :

- Arrêter rapidement et complètement la vibration d'une structure acoustique, par le biais d'un frottement intense. Ce cas est comparable à l'action des étouffoirs du piano.
- Modifier la durée de vibration et le timbre d'une structure acoustique. La durée d'amortissement est diminuée, de façon moins drastique que précédemment, tandis que certains modes de vibration sont particulièrement affectés. Cette utilisation se rapproche de la technique d'étouffement pratiquée par les guitaristes, qui posent une main sur la base des cordes pour en tirer un son bref et relativement pauvre en harmoniques aigus.
- Contrôler l'amplitude de vibration d'une structure acoustique disposant d'une source d'énergie interne (par exemple, une viscosité négative).

Le principe de l'étouffement, illustré dans la Figure 36, est le suivant :

- On relie les modules à amortir à un module MAS $\mathcal{M}_\varepsilon$ (généralement de très forte inertie) externe à la structure via des interactions de type BUT. Ceux-ci ont une élasticité nulle (K =0) ; en général, le seuil S est également laissé à 0.
- Après excitation de la structure acoustique, le module MAS externe, mis en mouvement par un moyen quelconque, se déplace pour passer d'une position initiale située au-dessus de la structure à une position située au-dessous de celle-ci. Les liaisons BUT sont alors actives et un frottement s'exerce sur les modules liés : la structure subit un amortissement supplémentaire.

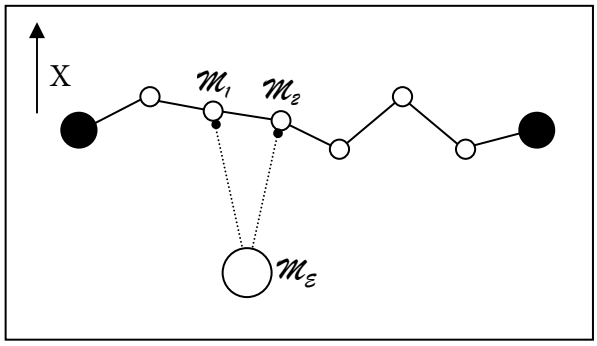


Figure 36 : L'étouffement : le module $\mathcal{M}_\varepsilon$ amortit les modules $\mathcal{M}_1$ et $\mathcal{M}_2$ tant qu'il se trouve en dessous d'eux

La mise en œuvre pratique de ce principe dépend évidemment du but de l'étouffement, que ce soit au niveau des paramètres (valeur de la viscosité des modules BUT) ou du comportement du module MAS externe (mouvement oscillatoire ou non, amplitude, vitesse de déplacement).

6. Résumé et conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini et classifié les composants élémentaires des modèles musicaux CORDIS-ANIMA : sous-modèles, structures, composants et interactions. Cette typologie est en réalité valable pour l'ensemble des modèles CORDIS-ANIMA, même si certains de ses aspects détaillés n'ont de réelle pertinence que pour des modèles destinés à produire des sons – nous pensons en particulier à la distinction entre structures acoustiques et structures macro-temporelles.

Par rapport à notre approche des modèles en tant que systèmes, nous avons dans un premier temps décrit les différents types généraux d'éléments et de relations entre ces éléments, en nous focalisant principalement sur l'aspect structurel. Nous avons décidé d'appréhender tout modèle comme un ensemble de structures en interaction, en donnant une définition précise de la notion de structure, étape importante étant donné la place centrale des structures dans la modélisation avec CORDIS-ANIMA.

Dans un deuxième temps, nous avons commencé à aborder l'aspect fonctionnel des modèles, en identifiant les quatre fonctions fondamentales qui doivent nécessairement être réalisées dans un modèle : la génération acoustique, l'excitation, la captation et l'amortissement. Nous avons étudié les conditions physiques élémentaires nécessaires à leur réalisation, en évoquant certains des composants associés. A travers ces considérations, nous n'avons fait qu'effleurer l'organisation générale d'un modèle GENESIS.

Dans les chapitres suivants, nous allons donc approfondir tous les aspects que nous venons d'aborder, c'est-à-dire :

- compléter l'analyse fonctionnelle des modèles, en identifiant puis en décrivant les fonctions « facultatives » d'un modèle CORDIS-ANIMA ;
- aborder le niveau poiétique, en nous penchant sur la relation entre les objectifs du modélisateur et les moyens mis en œuvre pour les obtenir ;
- à partir de tous ces éléments, élaborer une vision générale de l'organisation des modèles musicaux CORDIS-ANIMA.

Chapitre 5. Analyse d'un corpus de modèles GENESIS

Sur la base des concepts fondamentaux que nous avons définis dans le chapitre précédent, nous pouvons maintenant poursuivre l'élaboration de l'Instrumentarium d'une façon plus concrète, en nous intéressant non plus aux aspects les plus généraux, mais à la réalité et à la diversité des milliers de modèles réalisés avec GENESIS. Les premiers éléments dont nous disposons sont la vision systémique globale des modèles et les quatre fonctions fondamentales, que nous avons identifiées à partir de l'analyse des conditions élémentaires permettant la production de sons avec GENESIS. Aussi importants soient-ils, ces aspects ne constituent pas l'Instrumentarium à eux seuls, car ils ne reflètent pas tout ce qui *peut* se trouver dans un modèle, mais tout ce qui *doit* s'y trouver. Ils ne donnent par ailleurs que peu d'informations sur la façon dont les différents composants d'un modèle peuvent être mis en relation. Ils constitueront cependant le « fil rouge » de la suite de nos travaux.

Le schéma constitué des quatre fonctions fondamentales – qui relève d'une analyse objective des modèles physiques GENESIS – doit être intégré dans un tableau d'ensemble qui prenne en compte des aspects ne dépendant plus de conditions contingentes, mais de la liberté dont chaque utilisateur dispose pour l'organisation de ses modèles. Nous devons cependant parvenir à faire la synthèse de toutes les formes d'organisation possibles, à trouver des dénominateurs communs. Nous arrivons ainsi à une étape critique dans la conception de l'Instrumentarium, celle où une part de subjectivité peut faire son entrée. En effet, nulle catégorisation n'étant parfaite et universelle, nous allons être amenés à effectuer des choix sans forcément disposer de critères de décision objectifs. Reconnaissant par avance cette difficulté qui, si elle n'était pas maîtrisée, pourrait nous conduire à proposer une organisation aussi critiquable que celle du catalogue Brutel, nous nous devons d'ancrer le plus possible cette étape dans la pratique concrète de GENESIS. Comme nous l'avons déjà dit, la profonde originalité de cet environnement nous empêche de nous référer aux critères de catégorisation employée pour les instruments acoustiques et les environnements informatiques de création musicale. Dès lors, la seule référence objective dont nous disposons est le corpus de modèles crées depuis que GENESIS existe. C'est la raison pour laquelle notre construction de l'Instrumentarium est largement fondée sur une observation analytique de ce corpus, selon un parcours dont nous présentons, dans ce chapitre, les objectifs principaux (Section 1), la méthodologie (Section 2) et les résultats (Section 3). La dernière section présente une synthèse de ces différents résultats, en les situant dans la perspective des niveaux d'analyse neutre et poiétique.

1. Objectifs

1.1. Présentation

Il nous serait possible, grâce à l'expérience acquise au cours de plusieurs années de pratique, de proposer directement une organisation des fonctions GENESIS, des composants ou de toute autre catégorie d'éléments que nous jugerions pertinente. Mais cette organisation, quelque peu « tirée du chapeau », risquerait à la fois d'être incomplète et de n'être que le reflet d'une vision singulière, nécessairement partielle, de l'environnement. Nous serions alors en contradiction avec l'un de nos objectifs principaux pour la conception de l'Instrumentarium, celui de conserver autant que possible un point de vue neutre, qui tienne compte des pratiques de l'ensemble des utilisateurs actuels et qui ouvre le plus grand nombre de perspectives aux utilisateurs futurs.

Une étude de l'ensemble des modèles disponibles (cf. Section 2.2) s'impose dès lors comme une étape indispensable en préalable à toute formalisation de l'organisation des modèles GENESIS. Ce parcours doit permettre de faire émerger une structuration de l'Instrumentarium à partir de l'observation de ses éléments. Cet objectif est triple. Il s'agit en premier lieu, à un niveau conceptuel, de déterminer si les notions de *fonction* et de *composant* sont suffisantes pour élaborer une description complète des possibilités de modélisation ou si d'autres catégories sont à prendre en considération. D'autre part, à un niveau plus concret, l'observation et l'analyse de nombreux modèles doit aboutir à l'établissement d'une liste ou d'une hiérarchie de sous-catégories pour chacune de ces catégories de haut-niveau (c'est-à-dire au moins pour les fonctions et les composants). Ces deux aspects complémentaires sont illustrés dans la Figure 37. Enfin, dans la perspective du développement concret de l'Instrumentarium en tant que partie de l'Environnement Didactique, ce travail a pour rôle de recenser l'ensemble des aspects devant à terme être présents dans les documents et/ou la librairie de modèles fournis aux utilisateurs de GENESIS.

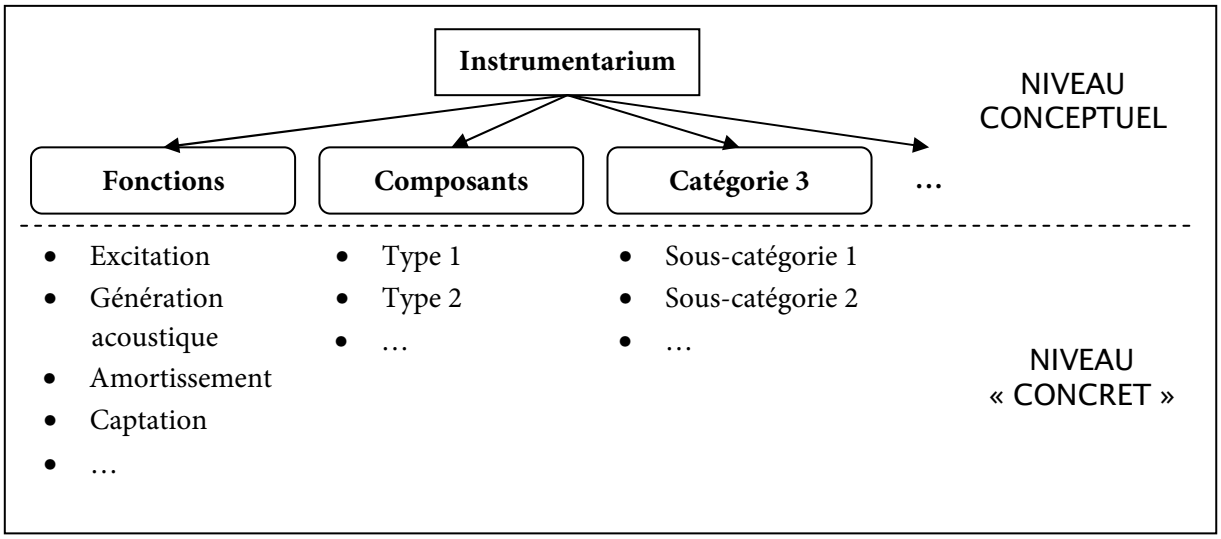


Figure 37 : Schéma général de l'organisation conceptuelle de l'Instrumentarium GENESIS

Le travail réalisé s'est décomposé en deux étapes. Nous avons tout d'abord collecté, au fur et à mesure de l'analyse des modèles parcourus, tous les « éléments intéressants » (cf. Section 1.2) de façon à constituer un « inventaire GENESIS », volontairement dépourvu de toute structure. Lors de ce parcours, nous avons mis de côté les propositions antérieures d'organisation de l'Instrumentarium GENESIS pour nous baser exclusivement sur les considérations développées lors de l'analyse élémentaire des modèles réalisée au chapitre précédent. Une fois le parcours des modèles terminé, nous avons regroupé les éléments de cet inventaire en différentes catégories, relativement hétérogènes, qui nous ont servi de base de réflexion pour proposer une structuration de l'Instrumentarium, au niveau « conceptuel » comme au niveau « concret ». Cette démarche, consistant à former des catégories *après* la constitution d'un ensemble non structuré d'informations, est une approche *bottom-up* comparable à celles que nous avons vues dans les classifications récentes des instruments de musique (cf. Chapitre 2, Section 2.2).

1.2. Un inventaire GENESIS

Il s'agissait donc, dans la première étape de cette étude, de réaliser un « inventaire GENESIS », c'est-à-dire de dresser, tout au long du parcours, une liste non ordonnée des *éléments* observés les plus

marquants. Nous utilisons volontairement le terme très général « éléments » pour insister sur le fait que nous avons cherché à collecter tout ce qui « fait sens » dans GENESIS, qu'il s'agisse d'un modèle précis, d'un type de structures, d'un phénomène ou encore d'une méthode de modélisation remarquable. Comme on le voit, les éléments pris en considération sont de natures diverses ; il ne s'agit donc pas d'un inventaire des *modèles* GENESIS, qui relèverait d'une approche sensiblement différente.

Aussi hétéroclites soient-ils, ces éléments ont pour point commun d'avoir retenu notre attention parmi les milliers d'éléments que nous avons observés ; ils nous ont parus « intéressants » pour l'ensemble des utilisateurs et donc susceptibles d'être intégrés à l'Instrumentarium. Deux critères principaux, opposés et complémentaires, nous ont permis d'évaluer cet intérêt :

- La « trivialité », c'est-à-dire le fait qu'on retrouve cet élément dans de nombreux modèles, ce qui indique *a priori* un caractère particulièrement fondamental. L'excitation par percuteur simple, la Corde, ou encore l'écoute sur Chevalet, sont des exemples d'éléments particulièrement courants qui se doivent de figurer dans l'Instrumentarium et de former les bases de tout parcours d'apprentissage de GENESIS,
- La « saillance », soit le fait qu'un élément se démarque particulièrement du « commun des modèles », que ce soit du point de vue de la production sonore ou des principes de modélisation. Un élément saillant présente souvent une certaine complexité ; son apprentissage sera donc, le cas échéant, plutôt destiné à des utilisateurs experts.[66]

L'inventaire n'a pas été constitué de façon empirique : ses éléments ont été obtenus par le biais d'une démarche rigoureuse d'analyse des modèles parcourus, décrite dans la Section 2. Chaque modèle ainsi examiné a successivement apporté ses propres éléments, qui ont été comparés à ceux déjà retenus et ajoutés à la liste s'ils n'y apparaissaient pas encore. Etant donné la diversité des éléments retenus, cette démarche n'exclut pas la possibilité d'une certaine redondance implicite de l'inventaire ; nous entendons par là que le fait que certains éléments de la liste peuvent inclure d'autres éléments. Dans ce cas, l'élément composite correspond à un degré de structuration supérieur, et nous le retenons précisément parce qu'il présente une certaine originalité et ne se réduit pas à la somme de ses parties.

Avant de procéder au parcours des modèles proprement dit, une première version de l'inventaire a été réalisée « de mémoire », selon la technique du *brainstorming*[67], puis complétée par une recherche bibliographique portant sur les modèles décrits dans les publications relatives à la création musicale avec CORDIS-ANIMA. Cette étape préliminaire visait d'une part à assurer plus d'efficacité dans le parcours des modèles (le fait de pouvoir passer plus rapidement sur des modèles bien connus constitue un gain de temps important) et d'autre part à diminuer le risque de laisser de côté certains éléments importants qui pourraient ne pas être représentés dans l'ensemble des modèles disponibles. En effet, ce corpus ne regroupe pas la totalité des modèles produits avec GENESIS depuis que l'environnement est utilisé, étant donné la disparité des circonstances (machines, lieux, époque, etc.) dans lesquelles ceux-ci ont été produits (cf. Section 2.2).

A l'issue du parcours, l'inventaire était constitué d'environ 150 mots clés ou expressions désignant les éléments retenus. Cette liste est largement incompréhensible telle quelle par des personnes non

[66] Notons que la saillance d'un élément n'est pas incompatible avec le fait qu'il ait été découvert (ou redécouvert) par un utilisateur débutant. Avec GENESIS comme dans n'importe quel domaine, le hasard, les essais et les erreurs peuvent jouer un rôle central dans le processus créatif.

[67] Ce travail a été réalisé en collaboration avec l'ensemble des chercheurs et doctorants travaillant sur GENESIS.

familières du « jargon » GENESIS spontanément inventé par les utilisateurs. Ceci pose à nouveau la question de la terminologie, que nous avons déjà abordée dans le chapitre précédent, mais cette fois-ci au niveau de la nomenclature des éléments de l'Instrumentarium. Un effort important devra être consacré à cette question lors de la réalisation finale de l'Instrumentarium, afin d'éliminer les particularismes liés à une pratique concernant jusqu'ici un nombre relativement restreint d'utilisateurs réguliers, ou, dans certains cas, de confirmer la terminologie déjà utilisée lorsqu'elle s'avère pertinente.

2. Méthodologie

2.1. Analyse des modèles

Le travail que nous avons réalisé visait, comme nous l'avons dit, à faire émerger de l'ensemble des modèles étudiés les éléments caractéristiques de la modélisation avec GENESIS. Pour cela, il est nécessaire de *comprendre* chaque modèle étudié, c'est-à-dire de déterminer une explication – qualitative, dans la majorité des cas – de sa production sonore. Ceci sous-entend que les deux échelles temporelles principales doivent être examinées :

- L'échelle *acoustique*, à laquelle appartiennent les phénomènes responsables des propriétés du son, en particulier la hauteur et le timbre. L'étude de cette échelle implique directement l'analyse des propriétés des structures acoustiques du modèle, ainsi que des modes d'excitation et de captation employés.
- L'échelle *macro-temporelle*, à laquelle appartiennent tous les phénomènes ayant des fréquences inférieures au seuil de l'audition et qui sont responsable de la production d'*évènements* individualisés (séquences de sons, transformations de la hauteur ou du timbre, etc.). C'est à cette échelle que se développe la structure musicale.

Dans les modèles les plus simples, notamment ceux à transmission directe (cf. Chapitre 4, Section 5.1.4), l'échelle macro-temporelle ne « contient » qu'un seul phénomène, l'excitation initiale ; l'analyse se concentre alors presque exclusivement sur l'échelle acoustique. Au contraire, pour certains modèles, comprenant des composants produisant une succession d'évènements, c'est la compréhension de l'échelle macro-temporelle qui peut demander l'effort le plus important. En outre, les deux échelles ne sont pas séparées par une frontière imperméable ; certains composants, comme le ZIG, sont susceptibles de passer de l'une à l'autre en cours de simulation et il est alors impossible de séparer le travail d'analyse en deux parties totalement distinctes.

La plupart du temps, il n'a pas été nécessaire de procéder à une étude analytique des propriétés des modèle, à l'exception des propriétés modales, qui sont accessibles pour les structures linéaires par l'intermédiaire de la fonction « Analyse/Accorder ». Nous ne cherchions pas, en effet, à caractériser de façon complète et précise les comportements observés. Au-delà du fait qu'il aurait été complètement irréaliste de réaliser une telle analyse, étant donné la quantité et la diversité des modèles à étudier, une telle démarche ne correspond pas à notre objectif, qui consistait, en quelque sorte, à « cartographier l'univers GENESIS ». Comme nous avons déjà eu l'occasion de le dire, l'étude mathématique précise des modèles CORDIS-ANIMA est un autre axe des travaux de recherche menés sur cet environnement. Notre travail n'a pas pour autant été réalisé de façon totalement empirique ; il s'est appuyé, à de multiples reprises, sur les résultats d'études précédentes, particulièrement celles menées par Eric Incerti [Incerti 1996], Pirouz Djoharian [Djoharian 1993 ; Djoharian 1999] et François Thil [Thil 2003].

L'étude de chaque modèle a suivi le fil conducteur constitué des quatre fonctions fondamentales décrites dans le chapitre précédent. Nous avons systématiquement identifié les différents éléments correspondants : les sources d'énergie du modèle ; la chaîne de transmission de l'énergie jusqu'aux structures écoutées ; les types de structure acoustiques ; les mécanismes d'amortissement ; les techniques de captation utilisées.

A partir de ces points essentiels, dont certains sont faciles à déterminer (l'observation de la structure et des conditions initiales du modèle est souvent suffisante), nous avons étudié précisément le fonctionnement du modèle en identifiant les types de composants en présence, leurs propriétés et leurs interactions. L'analyse de chaque modèle a été effectuée en plusieurs étapes qui sont détaillées ci-dessous. Parmi celles-ci, seules les deux premières (analyse visuelle de la structure du modèle et écoute) ont été systématiquement réalisées, et dans cet ordre. Les étapes suivantes ont parfois été omises, en particulier dans le cas de modèles simples ou appartenant à une famille dont l'un des membres avait déjà été étudié de façon complète. L'ordre dans lequel elles sont présentées n'est qu'indicatif, les allers-retours étant souvent nécessaires pour affiner progressivement la compréhension de l'ensemble.

Remarque
L'Annexe 4 présente plusieurs exemples d'analyse de modèles complexes, suivant la méthode que nous exposons ci-dessous.

2.1.1. Analyse de la structure

La première action réalisée lors de l'analyse d'un modèle consiste bien évidemment à ouvrir le fichier correspondant. Le modèle apparaît alors sur l'Etabli, nous apportant deux informations capitales :

1. Le type des modules présents, chaque type étant représenté par un élément graphique de forme et de couleur définis.
2. L'organisation spatiale des modules qui, dans la majorité des cas, reflète l'organisation physique, du modèle.

Rappelons que l'Etabli de GENESIS est neutre, dans le sens où la position des modules n'a aucune influence sur les propriétés et le comportement du réseau CORDIS-ANIMA ; l'utilisateur est donc libre de donner à cette espace une signification particulière l'aidant à se repérer dans le modèle. La tendance la plus générale et la plus naturelle est bien sûr de regrouper les modules appartenant à une même structure ou un même composant. En outre, il est souvent pratique d'associer aux deux dimensions de l'Etabli les valeurs de certains paramètres ou conditions initiales. Les structures composées de modules <MAT> de grande inertie sont ainsi habituellement placées au-dessus des structures de plus faible inertie, et les déclencheurs (cf. Section 6) sont souvent disposés de façon chronologique sur l'axe horizontal de l'Etabli. Cependant, aucune règle n'est imposée aux utilisateurs. Il est donc impossible d'interpréter avec certitude la disposition des modules, et les suppositions qu'on peut faire à ce stade doivent être vérifiées ultérieurement par l'examen des paramètres et des conditions initiales.

Cette première étude, visuelle et statique, permet d'identifier plusieurs éléments fondamentaux d'un modèle, parmi lesquels :

- existence de sous-modèles (chaque sous-modèle identifié étant ensuite étudié séparément) ;

- type des composants et des structures (cordes, membranes diverses, structures « maracassées », etc.)[68] ;
- type des interactions entre les composants ;
- présence de différentes échelles d'inertie[69] ;
- présence de déclencheurs ;
- composants dont les mouvements sont captés ;
- techniques de captation des mouvements.

A ce stade, la compréhension du modèle est encore grossière, particulièrement en raison du fait que l'Etabli ne donne aucune représentation des paramètres ou des conditions initiales des modules. De nombreuses inconnues subsistent, tout particulièrement les propriétés dynamiques (amplitude, vitesse ou fréquence de vibration) des composants identifiés ; il est nécessaire d'observer la simulation ou d'examiner les paramètres pour connaître cette information. De même, on ne connait que le type des modules <LIA>, mais pas encore leur nature exacte. Par exemple, on ne peut pas dire si un module REF qui relie deux structures apparemment indépendantes exerce un simple couplage entre les deux ou si, au contraire, l'interaction est suffisamment forte pour que l'ensemble doive être considéré comme une seule structure. Cette incertitude est particulièrement prononcée pour les liaisons BUT et LNL, puisque leur nature même peut changer selon les paramètres utilisés. On peut donc considérer que l'analyse structurelle n'est pas terminée tant que la nature des interactions n'est pas élucidée, ce qui passe nécessairement par l'observation des paramètres des liaisons.

Deux composants ayant la même topologie peuvent avoir des comportements totalement différents selon leurs paramètres. Par conséquent, la topologie est insuffisante pour la description des modèles. Ce point est particulièrement crucial pour les composants qui contiennent des modules LNL. Ceux-ci peuvent avoir des effets extrêmement différents suivant les caractéristiques LNLK et LNLZ – qui sont, rappelons-le, librement définies par l'utilisateur. On pourra alors considérer que deux composants ayant le même graphe associé n'ont pas réellement la même structure si la nature de leurs modules LNL est clairement différente.

2.1.2. Simulations du modèle

Avant de réaliser l'analyse de ses paramètres, nous avons simulé le modèle afin de confirmer ou d'infirmer les conclusions de l'étape précédente à l'aune des phénomènes produits et de répondre, au moins partiellement, aux questions encore en suspend.

---

[68] Dans les modèles récents, les structures comportant au moins une dizaine de modules MAT sont créées grâce à la fonction « Générer » de GENESIS ; ils apparaissent donc dans l'Etabli comme des figures de forme régulière ce qui les rend faciles à repérer.

[69] Cette indication est donnée par la taille des modules MAS et CEL sur l'Etabli, qui est plus ou moins importante selon la valeur de leur paramètre M. Cependant, cette information est partielle, car il n'existe que trois tailles différentes pour les éléments <MAT>, associées respectivement aux inerties « faibles », « moyennes » et « fortes » - le seuil séparant les trois catégories est fixé par l'utilisateur dans les préférences du logiciel. Il est impossible de donner une représentation proportionnelle de l'inertie, étant donné que le rapport entre ses valeurs maximales et minimales dans un modèle peut facilement dépasser 10^6 ; les modules les plus lourds auraient alors une taille démesurée par rapport aux plus légers, ce qui rendrait l'Etabli inutilisable.

2.1.2.1 Simulation sonore et écoute

Nous avons systématiquement commencé par une simulation sonore (fonction « Ecouter ») qui permet d'estimer dans une certaine mesure les propriétés du modèle, en particulier les paramètres des structures sonores linéaires.

Dans le cas de modèles simples (composés par exemple de structures sonores « classiques », comme des cordes et des membranes, excitées par des percuteurs), l'écoute révèle que des paramètres inhabituels ont été utilisés si le résultat sonore s'avère différent de ce qui est prévisible au vu de la structure du modèle. Dans le cas contraire, on peut passer plus rapidement à l'étude du modèle suivant.

Bien évidemment, quelle que soit son expérience, un utilisateur de GENESIS ne peut pas systématiquement établir un lien entre la structure du modèle et sa production sonore sans en avoir étudié les paramètres plus en détail. Cependant, l'écoute de centaines de modèles différents développe indéniablement une capacité à déceler certains phénomènes ne découlant pas de la structure du modèle mais de ses paramètres (comme une hétérogénéité prononcée, ou l'utilisation de valeurs extrêmes des paramètres), tout comme un expert en *design* sonore est, dans une certaine mesure, capable de reconnaître quelles méthodes de synthèse ou de traitements a été utilisée pour la production d'un son donné.

L'écoute est cependant la plupart du temps insuffisante pour aboutir à la compréhension des modèles plus complexes. Il est alors nécessaire de procéder à une investigation plus complète comprenant les étapes décrites ci-dessous.

2.1.2.2 Simulation visuelle

La simulation visuelle d'un modèle permet dans un premier temps de *décrire* ce qui se passe pendant la simulation, l'objectif suivant consistant à *comprendre* les phénomènes observés en se basant sur l'analyse structurelle et sur l'étude des paramètres et des conditions initiales. La fenêtre « Regarder » de GENESIS rend accessible la chronologie des évènements qui découlent des excitations initiales.

Tout comme l'écoute, la simulation visuelle est une observation du modèle en train d'être simulé, mais elle se situe à un niveau différent. Tout d'abord, la visualisation peut être suffisamment ralentie pour rendre observables des phénomènes inaccessibles en temps réel à l'œil et que l'oreille ne peut que percevoir, sans les analyser.[70] Ensuite, l'observation visuelle permet de confirmer ou d'infirmer l'identification des structures réalisée lors de l'analyse structurelle. En effet, une structure apparaît généralement comme un ensemble de modules dont les mouvements sont simultanés et appartiennent à des échelles spatiales et fréquentielles similaires. En visualisant les mouvements des modules, on peut donc comparer ces échelles pour différentes parties du modèle et déterminer quelles sont les structures qui sont le siège de vibrations acoustiques et celles qui ont des mouvements à l'échelle macro-temporelle.

Par ailleurs, en visualisant le modèle à l'instant 0 (début de la simulation), on repère les positions et vitesses initiales des modules <MAT>, ce qui indique quelles sont les sources d'énergie initiale du modèle.

[70] Incidemment, la possibilité de manipuler le cours du temps confère à la fonction « Regarder » des vertus pédagogiques évidentes. Grâce à elle, il est possible, par exemple, de voir les modes de vibration d'une structure acoustique évoluer au cours du temps, ou d'observer le phénomène d'accrochage – glissement caractéristique de l'interaction entre un Archet virtuel et un Corde.

2.1.3. Conditions initiales et paramètres

L'étape décisive de l'analyse d'un modèle, permettant de valider définitivement notre compréhension de ses propriétés et de son comportement, est l'étude de ses conditions initiales et de ses paramètres.

La fenêtre « Conditions initiales » permet de connaître précisément celles-ci. En sélectionnant l'ensemble des modules du modèle, on repère immédiatement lesquels ont une vitesse ou une position initiale non nulle et on identifie ainsi les sources d'énergie.

L'observation des paramètres est réalisée dans la fenêtre correspondante de GENESIS. Elle peut être très rapide pour les modules linéaires, mais demande plus d'attention pour les modules non linéaires, et plus particulièrement pour les modules LNL. L'étude des paramètres permet en premier lieu d'élucider la nature des interactions entre les structures (couplage, interaction unidirectionnelle, interaction ponctuelle, etc.). De façon plus générale, elle permet d'expliquer les comportement de certains composants ou structures, qui restent parfois relativement incompréhensible par la simple observation de la structure du modèle et sa simulation visuelle. Nous avons également souvent fait appel à l'outil « Analyse/Accorder » afin de déterminer les modes de vibration des structures linéaires.

2.1.4. Etude par modification

Pour l'analyse de modèles particulièrement complexes, ou présentant des comportements inhabituels, il nous a parfois été nécessaire d'opérer des modifications afin de comprendre précisément le rôle de chaque composant. Ces modifications peuvent prendre deux formes :

- Simplification progressive du modèle par suppression de modules. En procédant de la sorte, on identifie la contribution des modules retirés en comparant les comportements avant et après la modification. Cette démarche est poursuivie tant que la source du phénomène particulier que l'on cherche à expliquer n'a pas été trouvée.
- Modification des paramètres. Cette méthode permet de comprendre l'importance de certains paramètres clés dans un modèle vis-à-vis du résultat de la simulation.

L'analyse du modèle « Super Maracas », présentée en Annexe 4 (cf. p. 264), fait appel à l'étude par modification.

2.2. Origine des modèles étudiés

Les modèles GENESIS disponibles pour notre étude ont été produits par des utilisateurs ayant des degrés très variables d'expérience, dans des circonstances diverses. Ceci a un intérêt évident par rapport à l'objectif d'avoir une vision aussi large que possible de la modélisation.

On peut distinguer globalement trois types de pratiques de GENESIS :

- Les pratiques de courte durée dans le cadre de cours, de stages d'initiation pour le grand public ou d'ateliers pédagogiques. La durée totale de pratique de GENESIS varie de quelques heures dans les deux premiers cas à quelques jours dans le dernier.
- Les pratiques de durée moyenne (quelques mois) au cours de stages de recherche ou de projet ponctuels de création.
- Les pratiques de longue durée (plusieurs années). Deux cas se présentent ici :
    - Personnels permanents et doctorants de l'ACROE et du Laboratoire ICA.
    - Compositeurs collaborant avec l'ACROE et disposant de façon permanente de l'environnement GENESIS.

Ces circonstances très hétérogènes conditionnent évidemment les types de modèles produits et font toute la richesse du corpus de modèles que nous avons étudié, qui est composé de tous les fichiers ayant pu être archivés à l'issue de ces différentes pratiques. Bien sûr, nous ne disposons pas de *tous* les modèles produits avec GENESIS à ce jour, mais le corpus, fort de plus d'une dizaine de milliers de modèles[71], en représente une partie non négligeable. De plus, il comprend certainement la plupart des modèles les plus complexes ou les plus « avancés », c'est-à-dire ceux qui ont été produits au cours d'activités de recherche prolongée et ceux ayant servi à la création de pièces musicales.

Les informations concernant les modèles du corpus dépendent largement des circonstances dans lesquelles ils ont été produits. On dispose de très peu de détails sur les modèles produits pendant les pratiques de courte durée. Souvent, l'auteur du modèle (ou les auteurs, le travail par groupes de 2 ou 3 personnes étant courant) n'est même pas connu.

Au contraire, on connaît toujours les auteurs des modèles crées au cours de pratiques plus longues. Ceux associés à des activités de recherche (stages et thèses) sont documentés dans les rapports ou les mémoires correspondants. La documentation est beaucoup plus rare pour les modèles utilisés pour des créations – bien que quelques compositeurs aient pour habitude de prendre des notes succinctes, sous forme de fichiers textes, dans leurs répertoires de travail. Dans un cas comme dans l'autre, toutes les informations fournies par les auteurs eux-mêmes sont précieuses pour la compréhension des modèles, des intentions initiales et de la démarche de création.

Le logiciel GENESIS dispose d'une fonction permettant d'ajouter dans la fenêtre Etabli des commentaires qui peuvent aider à la compréhension des modèles. Cependant, une grande partie des modèles que nous avons analysés ont été crées avant que cette fonction ne soit disponible. Par ailleurs, elle a été très peu utilisée par les utilisateurs récents – il serait d'ailleurs intéressant d'en élucider la raison. Nous n'avons donc que très rarement pu nous appuyer sur ces commentaires lors de notre analyse du corpus.

Finalement, la seule information dont on dispose systématiquement est le nom du fichier qui contient le modèle. Il indique parfois quel aspect particulier était au centre des préoccupations de l'auteur, ce qui peut nous aider à orienter plus rapidement l'analyse du modèle vers les éléments les plus intéressants. Mais, dans de très nombreux cas, par exemple `Strucure1.top`, ou `Madame.top`, le nom ne donne aucune indication réellement utilisable ; tout juste peut-on supposer que plusieurs fichiers dont les noms ont une racine commune (`Madame-1.top`, `Madame-2.top`, etc.) contiennent différentes versions d'un même modèle.

2.3. Sélection des modèles

Idéalement, cette étude devrait être exhaustive, c'est-à-dire que nous devrions nous pencher sur chaque modèle rencontré au cours de l'exploration du corpus. En pratique, il est évident qu'une telle démarche n'est ni réaliste, ni complètement justifiée. Tout d'abord, le nombre de modèles à étudier est beaucoup trop important. De plus, une partie importante de ces modèles sont des variantes d'un même principe produisant des résultats sonores relativement proches. Certains utilisateurs travaillent en effet de façon très méthodique, en créant un nouveau fichier pour chaque nouvelle version des modèles sur lesquels ils sont en train de travailler, ce qui produit une grande quantité de fichiers pouvant contenir des modèles très similaires.

[71] Le nombre des fichiers disponibles est légèrement supérieur à 50 000, mais les archives ont une certaine redondance, ce qui nous empêche d'estimer le nombre exact de modèles uniques.

Il nous a donc fallu nous fixer des règles pour parcourir avec efficacité le contenu de répertoires qui peuvent contenir plus d'une centaine de modèles. Nous avons choisi de faire confiance aux auteurs, en nous fiant à l'organisation qu'ils ont adoptée pour leurs modèles. En premier lieu, nous sommes partis du principe que les noms donnés aux fichiers sont significatifs. Cela implique en particulier que tous les fichiers ayant des noms très similaires (le plus souvent, une première partie fixe, suivie d'indications variables, numériques ou non, donnant des précisions sur la version) reposent sur un même ensemble de principes de modélisation (voire ont la même structure), ne présentent que des différences quantitatives et ne doivent pas tous être examinés. Bien sûr il n'agit que d'une heuristique et il a fallu, dans chaque cas où l'on se trouvait effectivement devant une liste très longue de modèles semblant tous identiques à quelques paramètres près, en simuler un nombre suffisamment important pour éviter de passer à côté d'un modèle très différent des autres. Cette méthode s'est généralement révélée justifiée. On a par ailleurs pu constater que les utilisateurs donnaient souvent des noms clairement différents à des modèles ayant la même structure, mais dont le comportement ou la production sonore s'écartent complètement en raison des disparités au niveau des paramètres.

2.4. Les modèles auteur

Dans le corpus que nous avons étudié, on trouve un certain nombre de modèles qui ont été utilisés pour la production de pièces musicales identifiées (quelle que soit la « portée » de celle-ci, qu'il s'agisse d'un « mini-projet » réalisé à l'issue d'un atelier de travail ou d'une pièce diffusée plus largement). Nous les nommerons *modèles auteur*. Ils ne relèvent pas de l'essai ou de la recherche, mais d'un travail musical abouti, quel qu'en soit le degré de complexité. Cela leur confère un intérêt particulier, car ils démontrent des stratégies de production et d'organisation des modèles adoptées dans une situation de création, devant aboutir à un résultat présentable à un auditoire et répondant donc à des contraintes spécifiques. Il est par exemple intéressant d'étudier la façon dont les auteurs de ces modèles traitent la question de l'équilibrage des niveaux sonores entre différentes sources ou celle de la production de structures musicales complexes – problématiques qui sont la plupart du temps absentes dans les modèles plus simples produits lors de travaux de recherche ou durant l'apprentissage de GENESIS. De façon générale, les modèles auteur sont souvent remarquables par la mise en œuvre simultanée de plusieurs techniques de modélisation, parfois complexes, là où les modèles « d'étude » n'en mobilisent qu'un nombre plus limité.

3. Etude de l'inventaire

Nous exposons dans cette section les conclusions globales qui peuvent être tirées de la constitution et de l'analyse de l'inventaire GENESIS. Toutefois, l'utilité de ce dernier ne se limite pas aux aspects les plus conceptuels de la construction de l'Instrumentarium développés ci-dessous ; c'est une très riche collection d'informations qui sera utile tout au long de ce document (notamment en raison de la variété des composants qu'il comporte), ainsi que pour la réalisation concrète de l'Instrumentarium.

3.1. Organisation

Nous avons réalisé, à l'issue du parcours du corpus, une organisation de l'inventaire, en procédant par regroupement des éléments présentant des similitudes au niveau de leur nature, de leur rôle ou, plus généralement, de leur « thématique ». Il s'agit d'une méthodologie relativement empirique, qui ne produit donc que l'une des structurations possibles de l'inventaire. Nous avons aboutit à une liste de 15 catégories (Tableau 7).

Tableau 7 : Organisation de l'inventaire GENESIS

Excitation	**Modification**
Structures acoustiques	**Interaction unidirectionnelle**
Amortissement	**Métrologie**
Captation	**Initialisation**
Structures générales	**Modèles remarquables**
Déclenchement	**Glissandi**
Attaches	**Inclassables**
Génération macro-temporelle	

L'un des premiers enseignements de l'inventaire est la confirmation (si elle était encore nécessaire) de la complexité intrinsèque au développement de l'Instrumentarium. Entre l'hétérogénéité des éléments et des catégories, la multiplicité des points de vue possibles et la difficulté – inhérente à toute tentative de classification – de placer chaque élément dans l'une ou l'autre des catégories, il est évident que de multiples dimensions s'entremêlent ici pour former un tableau encore désordonné, éloigné de l'outil d'apprentissage que l'Instrumentarium doit devenir. Mais, dans le même temps, ce « grenier mal rangé » est une base solide pour le travail que nous réalisons, car nous pouvons être relativement sûrs du fait que tous les angles d'approches y sont représentés, qu'une certaine complétude qualitative est atteinte. Il nous faut maintenant analyser ce matériau de base pour en faire ressortir ses axes structurants, à commencer par les catégories du niveau conceptuel de l'Instrumentarium que nous avons évoquées dans la Section 1 de ce chapitre. Pour ce faire, nous allons tout d'abord identifier et étudier les types d'éléments présents dans l'inventaire.

3.2. Nature des éléments

Les éléments retenus dans l'inventaire sont de différentes natures, y compris au sein d'une même catégorie, ce qui n'est nullement étonnant étant donné la méthode que nous avons adoptée pour le constituer. Par exemple, la catégorie « Modification » comprend l'élément « A-taches », qui désigne un composant permettant d'établir une liaison viscoélastique temporaire entre deux modules <MAT>, l'élément « Couplage », qui est un type d'interaction particulier entre deux structures, ou encore l'élément « Etirement d'une structure grâce à un point d'attache mobile » qui correspond à une technique ou à un phénomène suivant le point de vue adopté. Il est donc clair que le point commun de tous les éléments d'une catégorie n'est pas leur nature, mais le « concept » désigné par le nom de la catégorie.

Il n'est pas surprenant de constater que la plupart des éléments de l'inventaire sont des composants : nous retrouvons là l'une des deux catégories principales que nous connaissions avant de procéder à l'inventaire. Les fonctions sont en revanche absentes en tant qu'éléments ; on les retrouve principalement au niveau du nom des catégories (cf. Section 3.3).

Le deuxième type d'éléments le plus courant dans l'inventaire correspond à ce qu'on pourrait appeler des *techniques de modélisation*. Examinons-en quelques exemples.

Utilisation de structures similaires désaccordées (cat. « Structures acoustiques »)
Dans cette situation, l'utilisateur a dupliqué une ou plusieurs fois une structure acoustique en changeant légèrement son accordage à chaque fois. On obtient globalement un son « épaissi » par rapport à celui que génèrerait seule la structure d'origine avec parfois, selon les paramètres, la perception de caractères sonores obtenus habituellement avec des effets de type « Chorus » ou « Flanger ».

« Réverbération à plaques » (cat. « Structures acoustiques »)
Cet élément désigne une situation dans laquelle une membrane est utilisée comme résonateur d'une structure acoustique excitée par un moyen quelconque. Le résonateur est excité via une interaction unidirectionnelle (élastique ou visqueuse) le liant à la structure acoustique. Le mouvement des deux structures est capté et éventuellement mélangé via une écoute par module SOF. Ce dispositif peut être vu comme une modélisation des réverbérations à plaque (mieux connues sous le terme anglophone *plate reverb*), dispositifs électromécaniques permettant, avant l'arrivée des réverbérations numériques, de simuler la réflexion d'un signal sonore dans un certain milieu.

Excitation « macroscopique » (cat. « Excitation »)
Cette méthode d'excitation particulière consiste à exciter simultanément plusieurs modules MAS voisins d'une structure à l'aide d'un seul composant (Figure 38). On modélise ainsi le fait que, comme pour les instruments réels, l'excitation ne s'applique pas à un seul point de la structure, mais à une portion significative de celle-ci ; on obtient de cette façon une mise en mouvement moins sélective des modes de vibrations. De plus, cette technique permet d'obtenir des évènements sonores plus réguliers qu'une excitation ponctuelle dans le cas d'excitations répétées.

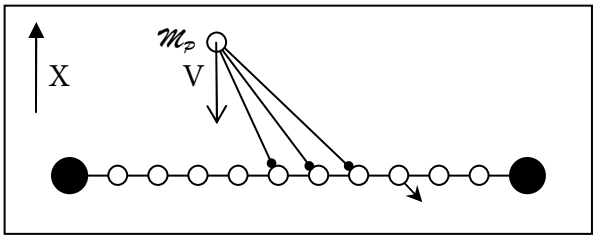


Figure 38 : Excitation « macroscopique » d'une Corde par percussion

Par ailleurs, nous avons déjà évoqué d'autres techniques, comme la production de glissandi grâce aux structures non linéaires (p. 151), l'écoute différentielle (p. 156), ou encore l'amortissement par frottement externe (p. 159). Il semble donc que l'idée de technique de modélisation ait une certaine pertinence.

L'inventaire répertorie également un certain nombre de modèles complets, qui sont tous regroupés dans la même catégorie, « Modèles remarquables ». Ces éléments se situent évidemment à un autre niveau que les autres, puisqu'ils ne résultent pas d'une analyse ; il s'agit d'objets informatiques réels et non d'abstractions.

Composants et techniques de modélisation représentent, avec les modèles complets, la majorité des éléments de l'inventaire. Quelques éléments, appartenant pour la plupart à la catégorie « Inclassables » ne se rattachent pas directement à l'une de ces trois catégories. Cependant, il semble possible dans chaque cas de revenir à l'une d'entre elles en adoptant un point de vue différent de celui ayant mené au choix de la dénomination de l'élément, comme le montrent les exemples suivants :

- L'élément « Pesanteur » (catégorie « Inclassables »), dont le nom fait référence à une loi physique réelle (donc un *phénomène*), désigne dans GENESIS une situation où une force constante est appliquée à un ou plusieurs modules par le biais d'une interaction LNL dont la caractéristique LNLK est une fonction constante (Figure 39), simulant ainsi un champ de pesanteur. Selon le contexte, on peut y voir un *composant* (l'ensemble formé par le module SOL et la liaison LNL qui applique la force constante) ou une *technique* permettant, par exemple, de faire rebondir une structure contre une autre à la manière d'une bille lâchée au dessus d'une surface plane.
- L'élément « Génération de battements par couplage de modules CEL » (catégorie « Inclassables ») correspond à la situation où deux modules CEL identiques, dont un seul est excité initialement, sont couplés par une interaction élastique faible. On observe alors que l'énergie se propage alternativement d'un CEL à l'autre en raison du couplage, donnant lieu à un phénomène de battement acoustique lorsque le mouvement de l'un des deux est capté. Cet élément correspond clairement à un *phénomène* observé. Toutefois, on peut aussi considérer la *technique* précise permettant de l'obtenir, qui consiste à relier les deux modules CEL par un module RES de raideur très inférieure à leur inertie (par exemple $K = 10^{-5} \times M$).

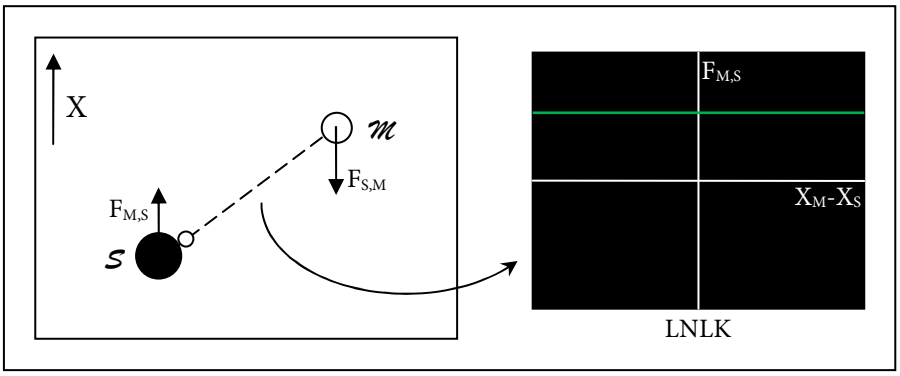


Figure 39 : Application d'une force constante à un module <MAT> (élément « Pesanteur » de l'inventaire)

Dans ces deux exemples, le même changement de point de vue a été opéré. Tandis que la dénomination des éléments fait explicitement référence à un phénomène et se place donc au niveau neutre, il est possible d'établir une correspondance avec le dispositif engendrant ce phénomène et de revenir ainsi aux notions de composant ou de technique. Ce changement est en réalité possible pour tous les éléments « atypiques » de l'inventaire.

A ce stade, nous pouvons donc constater que la notion – pour l'instant relativement informelle – de *technique de modélisation* revient à plusieurs reprises lorsqu'on examine la nature des éléments de l'inventaire. Elle apparaît potentiellement comme une catégorie conceptuelle importante, au même titre que les *fonctions* et les *composants*. Nous allons nous intéresser dans la section suivante à la nature des catégories de l'inventaire afin de vérifier si cette hypothèse s'avère pertinente. A côté de ces trois catégories abstraites, on trouve des *modèles complets*, seuls éléments concrets de l'inventaire qui, de fait, n'entrent pas dans la formalisation de la modélisation avec GENESIS, mais ont une valeur d'exemple tout aussi importante dans une perspective pédagogique.

3.3. Les catégories de l'inventaire

On retrouve, au travers des quatre premières catégories de l'inventaire (« Excitation », « Structures acoustiques », « Amortissement » et « Captation ») les fonctions fondamentales GENESIS. Il est

intéressant de noter qu'une seule de ces catégories (« Structures acoustique ») porte un nom désignant des *objets* et non une *action*. Il aurait d'ailleurs été possible de nommer cette catégorie « Génération acoustique » – c'est la fonction fondamentale correspondante – sans pour autant en changer la signification. Il existe en effet, dans ce cas précis, une identification complète entre fonction et composant : la Génération acoustique est nécessairement réalisée par une structure acoustique.

Parmi les catégories suivantes, 5 correspondent à des fonctions que nous n'avions pas encore identifiées (des composants correspondant à certaines d'entre elles apparaissent toutefois dans la classification Brutel et la grammaire Toussaint). Contrairement aux fonctions fondamentales, elles ne sont pas nécessaires au fonctionnement d'un modèle, même si deux d'entre elles (la Génération macro-temporelle et le Déclenchement) sont extrêmement courantes. Elles seront étudiées en détail dans le Chapitre 6 ; nous n'en donnons pour l'instant qu'une courte description :

- Génération macro-temporelle : production de mouvements situés dans le domaine macro-temporel.
- Déclenchement : lancement d'un processus correspondant à la réalisation d'une ou plusieurs fonctions.
- Modification : modification de la structure, des propriétés ou du comportement d'un composant en cours de simulation.
- Métrologie : mesure de grandeurs physiques dans un modèle ou détection d'évènements associés à celles-ci.
- Initialisation : préparation d'un composant pour son utilisation ultérieure.

Ce sont donc, au total, 9 catégories de l'inventaire qui correspondent à des fonctions. Les 6 catégories restantes ont des natures diverses, que nous allons maintenant examiner.

3.3.1. Structures générales

Cette catégorie regroupe des types de structures qui sont utilisées aussi bien au niveau acoustique qu'au niveau macro-temporel.[72] Il ne s'agit donc pas de composants, car ils n'ont pas de fonction associée. Certains éléments relèvent de la typologie des structures que nous avons réalisée dans le chapitre précédent, tandis que d'autres désignent des structures très souvent utilisées (Chapelets, membranes diverses, ZIG, etc.), dont les propriétés les plus simples doivent être connues par tout utilisateur de GENESIS. Il est clair que les documents de l'Instrumentarium devront aborder ces deux aspects qui, bien que regroupés dans une seule catégorie de l'inventaire, relèvent en fait de deux niveaux différents.

3.3.2. Attaches

Cette catégorie ne contient que 4 éléments (« SOL », « SOF », « Chevalet » et « MAS de forte inertie ») : ce sont les *composants* qui jouent le rôle de point d'attache ou de point de butée dans les modèles GENESIS.

3.3.3. Interactions unidirectionnelles

Cette catégorie inclut les différentes situations mettant en jeu des interactions unidirectionnelles, au sens où nous les avons définies dans le chapitre précédent. La nature de cette catégorie est plus délicate

[72] Remarquons que l'usage a parfois attribué des noms différents à une même structure selon le niveau auquel elle se trouve. Par exemple, le Chapelet est parfois nommé « Serpent » au niveau macro-temporel et « Corde » au niveau acoustique.

à déterminer. On est tenté en premier lieu de penser qu'il s'agit aussi d'une catégorie de *composants*, puisque ces interactions sont réalisées par un module <LIA>. Ce pendant, ces modules, pris isolément, n'ont aucune propriété intrinsèque qui les distinguerait de n'importe quelle autre <LIA> : c'est uniquement dans un contexte précis, en raison d' un rapport particulier entre leurs paramètres et les échelles des grandeurs physiques des deux composants mis en relation, qu'ils donnent naissance à une interaction particulière. Il apparaît donc que cette catégorie contient non pas des composants isolés, mais un ensemble de *situations* ayant des caractéristiques bien déterminées. Au niveau physique, on peut s'en tenir à la description de ce qu'est une interaction unidirectionnelle. Mais dans une perspective d'apprentissage pour la pratique, il est plus pertinent de se placer au niveau poiétique et donc de considérer ces situations comme des applications d'une technique de modélisation basées sur des règles bien connues permettant d'obtenir une interaction unidirectionnelle.

3.3.4. Modèles remarquables

Nous avons regroupé au sein de cette catégorie des modèles – en particulier des modèles auteur – qui montrent un degré important de maîtrise de la modélisation. Il s'agit en général de modèles complexes qui mettent en œuvre des principes de modélisation d'un niveau avancé et combinent de nombreux composants différents, surtout en ce qui concerne les modèles auteur comme ceux qui produisent les pièces *pico..TERA* (2002) et *Gaea* (2007) de Claude Cadoz, ou *Aion Chryseon* (2007) de François Poyer. Ce sont des exemples de travaux aboutis, représentatifs d'une certain démarche de modélisation menée jusqu'à son terme. Ils sont donc intéressants à la fois dans leur globalité – un certain nombre d'entre eux pourront d'ailleurs être intégrés à une librairie de modèles distribuée avec GENESIS – et en tant qu'objets d'analyse, en raison des différents types de composants et de techniques de modélisation qu'ils recèlent. Ces modèles ont d'ailleurs été étudiés de la même façon que tous les autres ; les éléments pertinents ont été identifiés et placés dans les autres catégories de l'inventaire. Notons que de nombreux éléments de la catégorie « Modèles remarquables » correspondent en réalité non pas à un seul modèle, mais à un ensemble de modèles réalisés par un même auteur. Il était en effet inutile de répertorier indépendamment des modèles basés sur le même principe. Par exemple, l'élément « HPST » désigne plus d'une quinzaine de modèles du compositeur Hans Peter Stubbe Teglbjærg, tous basés sur un technique de modélisation où un ZIG amorti met en vibration un Chapelet, excitant successivement les différents modes de vibration de celui-ci.

3.3.5. Glissandi

Cette catégorie a été constituée suite à l'observation du fait que de nombreux auteurs de modèles se sont intéressés à la production de glissandi, en s'y prenant presque à chaque fois de façon différente. Six approches ont été répertoriées. L'obtention d'un glissando avec GENESIS n'est pas triviale – sans que les différentes solutions soient nécessairement très complexes. Si le nom « Glissandi » renvoie clairement à un type de *phénomènes* précis, nous sommes ici face à une catégorie comportant des composants et des techniques de modélisation.

3.3.6. Inclassables

Cette dernière catégorie regroupe, comme son nom l'indique, des éléments dont le seul point commun est de n'entrer dans aucune des autres catégories. Elle contient principalement des objets simples, comme la **Butée double*** ou la Cellule TFP, qui ont tous des propriétés remarquables et peuvent réaliser différentes fonctions selon la manière dont ils sont utilisés. Les autres éléments de cette catégorie, dont nous avons cité deux exemples dans la section précédente (« Pesanteur » et « Battements générés par couplage de modules CEL »), peuvent être vus comme des techniques de modélisation.

3.4. Les techniques de modélisation

3.4.1. Contexte et exemples préliminaires

Apparaissant à de nombreuses reprises dans l'inventaire GENESIS, la notion de technique de modélisation est clairement aussi importante que les catégories conceptuelles fonctions et composants. Alors que celles-ci abordent la modélisation sous un angle analytique et formel, les techniques de modélisation sont de l'ordre du savoir-faire. Comme nous le verrons dans la Section 4 de ce chapitre, ces trois catégories conceptuelles sont complémentaires.

Mais que signifie exactement « technique de modélisation » dans le contexte de GENESIS ? Afin de le préciser, commençons par examiner quelques définitions générales du mot « technique » :

> « Ensemble des procédés propres à une activité et permettant d'obtenir un résultat concret. »
> (Dictionnaire Trésor de la Langue Française) [TLFi – « Technique »]

> « 1. Ensemble de procédés et de moyens pratiques propres à une activité : *La technique de l'aquarelle.*
> 2. Manière de faire pour obtenir un résultat : *Dérouter son interlocuteur par des questions, c'est sa technique.*
> 3. Ensemble de procédés reposant sur des connaissances scientifiques et destinés à la production : *La technique des centrales nucléaires.* »
> (Dictionnaire Larousse)

> « L'ensemble des procédés d'un art, d'une fabrication. »
> (Dictionnaire Littré)

On note tout d'abord que l'expression « ensemble de procédés » revient dans quatre définitions sur cinq. En outre, on peut dégager de ces définitions deux acceptions appartenant à des niveaux différents :

- La définition du TLF et la deuxième du Larousse se concentrent sur l'obtention d'un *résultat* concret. Si on considère un domaine d'application donné, de multiples techniques peuvent donc s'y rattacher.
- Les définitions 1 et 3 du Larousse, ainsi que celle du Littré présentent la technique dans un sens plus général, comme l'ensemble des procédés spécifiquement liés à un domaine ou à une activité donnés. Le mot est alors utilisé au singulier.

Ces acceptions peuvent être toutes les deux transposées au domaine particulier qu'est la création musicale avec GENESIS, mais il est bien évident que c'est la première qui nous intéresse dans le cadre de l'analyse de l'inventaire. Nous ne sommes pas en train de parler de *la* technique de création avec GENESIS – ce que nous ferions si nous étions en train de comparer globalement cet environnement avec d'autres. Nous étudions *les* techniques de modélisation dans GENESIS.

A chaque fois que nous avons évoqué la notion de technique de modélisation, l'idée d'un résultat particulier était systématiquement présente, parfois de manière implicite. Revenons sur quelques-uns de ces exemples :

Structures identiques désaccordées

Le résultat de la technique, qui consiste à utiliser simultanément plusieurs structures identiques désaccordées, se situe au niveau de la qualité du son produit, c'est-à-dire au *niveau sonore* et, par conséquent, *esthésique*. Selon les situations, on recherche soit à obtenir une certaine « épaisseur » (ce

qui est comparable, dans l'orchestration traditionnelle, à faire interpréter une même voix par plusieurs instrumentistes), soit à produire un effet sonore évoquant les traitements de type « Chorus » ou « Flanger ». Plusieurs résultats différents étant possibles, il s'agit d'une technique « générale » ayant plusieurs variantes qui diffèrent par les détails de la mise en œuvre, en particulier la disparité d'accordage entre les structures. Cette technique est rattachée à la fonction « Génération acoustique » ; c'est une façon particulière, orientée vers un objectif précis, de la réaliser.

Génération de battements par couplage de modules CEL
Cette technique décrite dans la Section 3.2 est, comme la précédente, rattachée à la fonction « Génération acoustique ». Selon qu'on écoute un seul module CEL ou les deux (sur deux canaux différents), on obtient soit un battement acoustique, soit un son qui se déplace alternativement entre les deux canaux. Là encore, le résultat de la technique est un type de phénomène sonore particulier. Dans le deuxième cas, le son produit évoque le mouvement d'une source sonore. Cette technique peut donc être abordée au niveau perceptif, en tant que réponse possible à la question « comment produire avec GENESIS un son se déplaçant dans l'espace ? ».

Ces techniques – nous aurions pu en citer beaucoup d'autres – réalisent une fonction de façon particulière, en remplissant certaines « conditions » au niveau sonore et esthésique. Elles ont un effet sensible sur la production sonore du modèle. Les résultats obtenus ne sont pas propres à GENESIS : les battements, la simulation du déplacement d'une source sonore ou l'effet de chœur sont des phénomènes qui peuvent être obtenus avec de nombreuses méthodes de synthèse ou de traitement du son.

D'autres techniques sont en revanche complètement propres à GENESIS. Répondant à des problèmes pratiques, elles permettent de réaliser des actions nécessaires au bon fonctionnement d'un modèle. Elles ont bien sûr un impact sur la production sonore, mais le résultat directement visé n'a de sens que dans le cadre du formalisme CORDIS-ANIMA. En voici deux exemples, le premier ayant déjà été abordé dans la Section 5.3.3 du Chapitre 4.

Ecoute différentielle
Cette technique permet, comme nous l'avons montré, de capter les vibrations acoustiques d'une structure mobile. Le résultat recherché est la suppression de la composante continue ou à très basse fréquence du mouvement des modules écoutés. On réalise ainsi la fonction fondamentale de Captation dans des conditions très particulières. Cette technique n'a pas d'équivalent dans le monde réel : nous pouvons naturellement entendre les sons émis par des sources se déplaçant par rapport à nous. Elle n'en a pas non plus dans d'autres méthodes de synthèse du son, soit parce que la notion de mouvement n'y existe tout simplement pas, soit parce qu'elle est prise en compte par des outils spécifiques de traitement du signal.

Déclenchement d'un Domino stationnaire
Le terme **Dominos*** désigne un type de structures libres non linéaires capables d'engendrer des figures rythmiques régulières. En l'absence de point d'attache, un Domino peut être mobile ou stationnaire suivant la façon de le mettre en mouvement. Une excitation par percussion de l'un de ses modules MAS entraîne un mouvement d'ensemble du Domino, qui se déplace indéfiniment dans la même direction. Or, on a souvent besoin qu'un Domino soit stationnaire, par exemple s'il est utilisé pour percuter une autre structure. Pour cela, il faut effectuer un déclenchement plus complexe, nécessitant deux percussions successives réalisées selon des conditions très précises. Il est évident que cette technique est propre aux modèles GENESIS : son résultat, la « stationnarité du Domino » n'a aucun sens dans un autre contexte. En outre, elle est « transparente » du point de vue sonore : un Domino

stationnaire réalisant N percussions au cours de la simulation peut être remplacé par N Percuteurs élémentaires correctement minutés sans qu'on puisse distinguer de différence à l'écoute.

3.4.2. Définition

Etant donné les observations précédentes, nous donnerons la définition suivante :

> Une technique de modélisation est un procédé permettant d'obtenir un résultat défini associé à une fonction GENESIS ; ce résultat est un phénomène pouvant soit être lié au domaine musical (*technique générale*), soit faire référence uniquement à la modélisation dans GENESIS (*technique propre*). Par « procédé », on entend l'utilisation d'un composant ou d'un ensemble de composants particulier, selon des règles précises concernant leurs paramètres et leurs conditions initiales.

Une technique peut avoir plusieurs variantes, comme dans l'exemple des structures identiques désaccordées. Les variantes sont basées sur le même procédé général, appliqué selon des règles distinctes, ce qui entraîne l'obtention de résultats différents.

Par ailleurs, notons qu'une technique peut se réduire à l'utilisation d'un composant. Par exemple, la « technique de Captation directe » consiste simplement à placer un module SOX sur un module <MAT> afin d'en enregistrer le mouvement. Toutefois, ce n'est pas parce qu'une technique est extrêmement simple à appliquer qu'il n'y a rien à en dire, bien au contraire. La simplicité est souvent synonyme d'une mise en œuvre très fréquente : la technique mérite donc d'être étudiée et documentée de façon complète. Ainsi, dans l'exemple que nous venons de prendre, l'utilisateur doit être conscient, au moment de placer le module SOX, que la position de ce dernier aura une influence sur les qualités du son, et il doit disposer des informations lui permettant de faire ce choix en fonction du résultat attendu.[73]

3.5. Modélisation et effets de la quantification

Le parcours des modèles GENESIS nous a permis d'observer que de nombreux utilisateurs « jouent » avec les limites de l'environnement au lieu de les éviter, exploitant de façon créative les situations où les algorithmes de simulation perdent, au moins partiellement, leur cohérence physique. Cette tendance à tirer parti de tous les aspects de la modélisation, y compris ceux – parfois difficiles à maîtriser – basés sur des comportements non physiques, indique clairement qu'une partie importante des utilisateurs n'envisagent pas uniquement l'environnement comme un outil de modélisation d'objets ou de phénomènes réels, mais, plus généralement, comme un outil de création « en soi », régi par des lois propres en partie comparables à celles de la physique.

Le principal effet de la quantification exploité dans les modèles est l'effet Thil. Il apparaît le plus souvent dans des structures maracassées destinées à générer des sons bruités de longue durée ; il y produit des variations aléatoires de la vitesse des modules MAS, ce qui se traduit par une évolution de l'amplitude et de la hauteur du son. On l'observe aussi dans des modèles plus particuliers, comme les « REBONDS ».[74] Le phénomène de divergence, correctement contrôlé, est également mis en œuvre (cf. Annexe 4, p. 264) ; généralement causé par des valeurs élevées de la raideur des interactions élastiques

[73] Ici, ce n'est pas la technique en elle-même qui doit être étudiée, mais les propriétés de la structure acoustique.

[74] Cet ensemble, élément de la catégorie « Modèles remarquables » de l'inventaire, est basé sur le principe de la bille qui rebondit ; de façon imprévisible, ces rebonds lui font parfois gagner de l'énergie au lieu de lui en faire perdre. La bille n'en finit donc pas de rebondir, produisant une séquence sonore qui évoque immanquablement le phénomène normal de rebond, mais avec une alternance aléatoire de phases de relance et d'amortissement.

par rapport aux inerties des modules MAS, il entraine la production de sons particulièrement riches en harmoniques aigus. Enfin, de façon plus anecdotique, on a observé un certain nombre de modèles pour lesquels la discrétisation temporelle joue un rôle important dans la séquence des sons produits. C'est par exemple le cas dans des modèles où une structure est « pincée » de façon répétée par un plectre se déplaçant à grande vitesse ; dans ces conditions, le pincement n'a pas nécessairement lieu à chaque passage du plectre, car il est possible que celui-ci « traverse » la structure sans interagir avec elle (Figure 40).

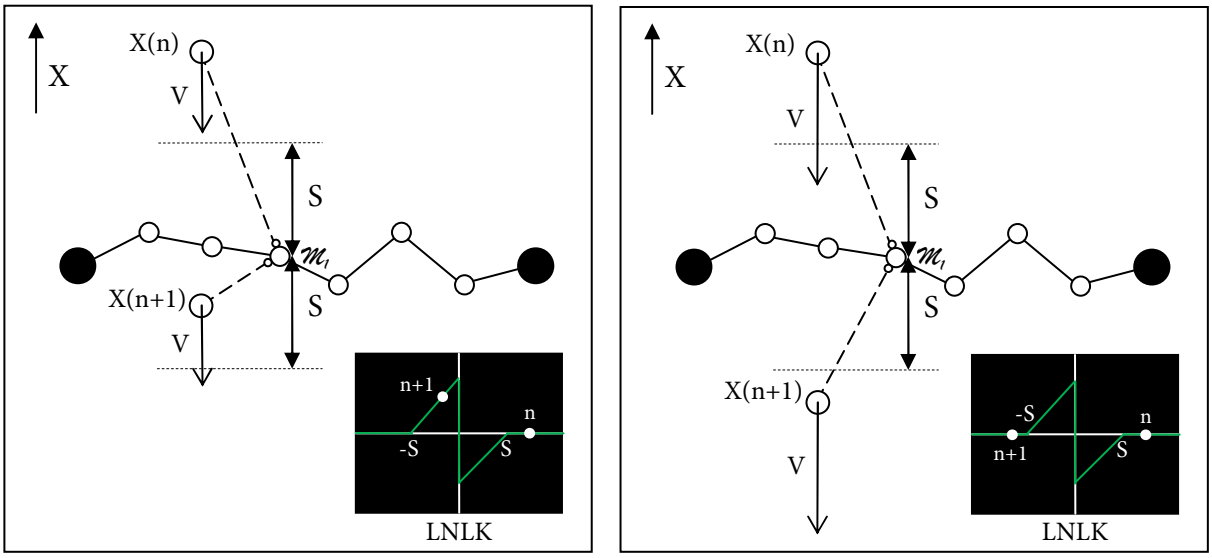


Figure 40 : Pincement d'une structure à haute vitesse. La caractéristique LNLK du Plectre est représentée, avec les points de fonctionnement aux instants de simulation n et n+1. Le pincement n'a lieu que dans la situation de gauche. A droite, le « Plectre » passe en un seul pas de simulation d'un côté à l'autre du seuil de l'interaction, il n'a donc aucune action sur $\mathcal{M}_r$.

Il est indéniable que les effets de la quantification font partie intégrante de la « palette » de l'utilisateur de GENESIS et qu'ils apportent des possibilités créatives originales et pertinentes. Puisqu'ils ne sont pas appréhendés comme des « défauts » du système de simulation dont il faudrait impérativement s'éloigner, mais comme des « outils » à part entière, chaque utilisateur qui souhaite les utiliser doit disposer des moyens permettant de les maîtriser. Cela implique d'une part de les étudier le plus complètement possible – ce qui a déjà été fait en grande partie, notamment en ce qui concerne l'effet Thil – et d'autre part de présenter les résultats pratiques de cette étude dans les documents de l'Instrumentarium. On peut même envisager d'ajouter à l'environnement des fonctionnalités spécifiques à cette problématique, tout comme on dispose déjà d'outils pour analyse et accorder les structures linéaires.

3.6. Les objets remarquables

Les objets remarquables sont des modules ou de petits ensembles de modules, apparaissant dans la catégorie « Inclassables » de l'inventaire, dont des propriétés intrinsèques sont particulièrement utiles ou originales, comme la Cellule TFP et la Butée double. Il ne s'agit pas de composants, car ils peuvent généralement être utilisés pour réaliser plusieurs fonctions différentes.

On peut considérer les objets remarquables comme des modules (ou des macro-modules) spécialisés. On leur attribuera ce statut dans l'Instrumentarium, ce qui mènera à la réalisation d'une description détaillée pour chacun d'eux, au même titre que les modules élémentaires de GENESIS.

4. Relations entre fonctions, composants et techniques de modélisation

Nous avons identifié trois catégories conceptuelles (fonctions, composants et techniques de modélisation) qui permettent de décrire et d'analyser, sur différents niveaux, la façon dont un modèle GENESIS est organisé. Nous allons maintenant nous attacher à faire la synthèse de leurs relations et des différents aspects de la modélisation qu'elles recouvrent. Nous montrerons leur complémentarité et justifierons ainsi la complétude de cette analyse conceptuelle des modèles.

4.1. Synthèse

La définition que nous avons donnée de la notion de composant intègre déjà sa relation avec celle de fonction : un composant réalise une fonction identifiée. Cette relation est confirmée par l'organisation de l'inventaire, où nous avons vu que les catégories correspondant aux fonctions contiennent une liste de composants ou de techniques mettant en œuvre des composants. Formulons la relation dans l'autre sens : une fonction donnée est réalisée par un composant, ou par un groupe de composants. Par exemple, la Captation peut se faire dans certaines situations par un composant seul, le module SOX ; le Déclenchement d'un Domino stationnaire nécessite, quant à lui, deux composants indépendants, des Percuteurs élémentaires. Au vu de tous les exemples que nous avons déjà cités, il est par ailleurs évident que plusieurs composants différents peuvent réaliser une même fonction (Figure 41).

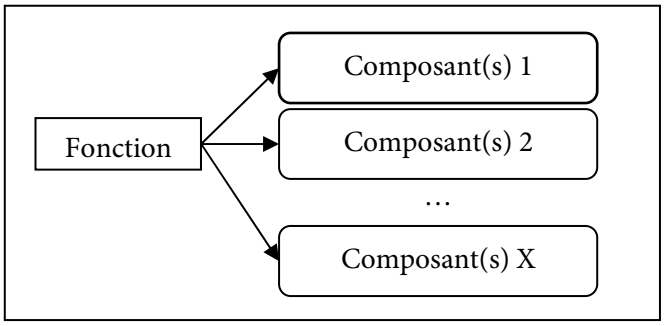


Figure 41 : Réalisation d'une fonction par différents composants ou groupes de composants.

Une fonction est une notion abstraite et générale, à laquelle correspond un vaste ensemble de phénomènes physiques ou sonores. En restreignant cet ensemble, c'est-à-dire en imposant des conditions sur le résultat de la fonction, on « sélectionne » implicitement les composants capables de les remplir ainsi que les règles de mise en œuvre appropriées, c'est-à-dire les techniques de modélisation correspondantes. (Figure 42). Bien sûr, plus le résultat attendu est précis et moins les techniques de modélisation appropriées seront nombreuses.

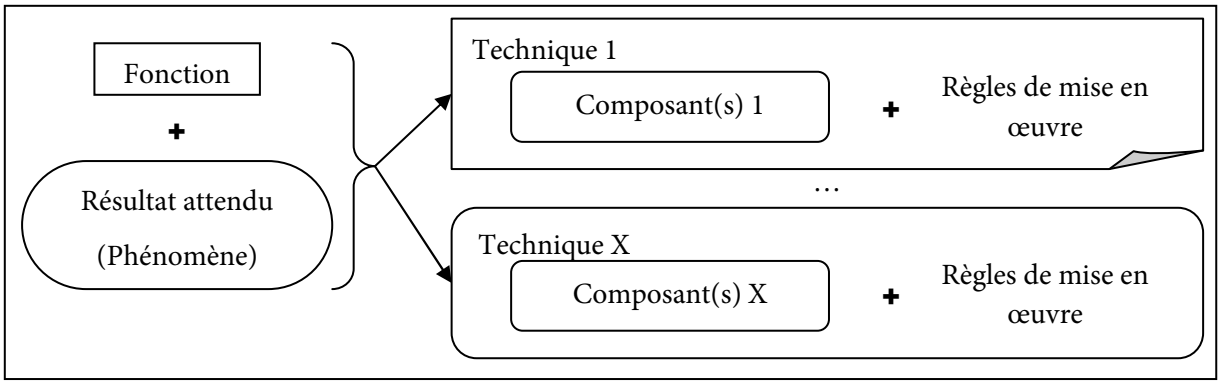


Figure 42 : Une ou plusieurs techniques de modélisation permettent de réaliser une fonction avec un résultat attendu spécifique.

4.2. Complémentarité des catégories conceptuelles

4.2.1. Au niveau neutre : fonctions et composants

Les fonctions que nous avons identifiées et les catégories de composants correspondants relèvent du niveau neutre, et le plus souvent du sous-niveau physique. Ceci découle logiquement de notre choix de privilégier une analyse des modèles basée le plus possible sur leur phénoménologie, sans « interprétation », choix qui, rappelons-le, se justifie par la volonté de formaliser l'organisation des modèles GENESIS de façon aussi neutre que possible. Se concentrant sur la modélisation et la simulation, les neuf fonctions identifiées décrivent donc uniquement les catégories de phénomènes physiques se produisant au sein des modèles et comment les différentes parties de ceux-ci interagissent. Aucune fonction n'est explicitement liée au domaine musical – et donc au niveau poiétique : nous n'avons pas retenu la « Génération d'une note », ni, *a fortiori*, le « Jeu d'une mélodie » ou la « Génération d'un rythme à quatre temps » …

4.2.2. Au niveau poiétique : les techniques de modélisation

Pourtant, les modèles peuvent produire des notes, des mélodies, des rythmes à quatre temps, ainsi que bien d'autres types de phénomènes sonores et de structures musicales. L'un des enjeux de l'Instrumentarium est d'enseigner à l'utilisateur de GENESIS comment les obtenir, c'est-à-dire comment passer d'une idée sonore ou musicale précise à sa réalisation concrète. Limitées au niveau neutre, les notions de composants et de fonctions sont insuffisantes dans cet objectif : elles ne permettent pas de faire complètement le lien entre le langage du musicien ou du compositeur et celui de la modélisation.

Il est évident qu'une pédagogie de la création musicale avec GENESIS ne peut se passer d'aborder le niveau poiétique. C'est précisément le rôle des techniques de modélisation – et particulièrement des techniques générales – que d'établir ce lien entre le domaine musical et le domaine CORDIS-ANIMA, d'aborder le *savoir-faire* en complément du *savoir* constitué représenté par les fonctions et les composants (Figure 43).

Niveau	Catégories conceptuelles
Niveau poiétique	Techniques de modélisation
Niveau neutre	Fonctions Composants

Figure 43 : Positionnement des catégories conceptuelles dans les niveaux d'analyse

Ainsi, les trois catégories conceptuelles « couvrent » ensemble le niveau poiétique et le niveau neutre. On peut alors dire qu'elles constituent la base d'une pédagogie de la création musicale avec GENESIS.

Toutefois, la notion de technique dans le sens où nous l'avons définie, c'est-à-dire en étroite liaison avec les fonctions, ne suffit pas à décrire l'ensemble du niveau poiétique. En effet, elle ne prend pas en compte les stratégies de production à l'échelle globale du modèle. Il nous reste donc à décrire les principes généraux d'organisation concrète d'un modèle, tâche à laquelle nous nous consacrerons dans le Chapitre 7.

5. Conclusion

A l'issue du parcours des modèles GENESIS, de la constitution puis de l'analyse de l'inventaire, nous aboutissons à une vision – encore partielle – de l'organisation de l'Instrumentarium. Ce travail nous a apporté deux enseignements principaux. En premier lieu, nous avons complété la liste des fonctions GENESIS, avec cinq nouvelles fonctions que nous décrirons dans le chapitre suivant. Par ailleurs, au niveau conceptuel nous avons définis une nouvelle catégorie, les *techniques de modélisation*, qui vient compléter le schéma commencé avec les notions de *fonction* et de *composant* (Figure 44). Fonctions, composant et techniques de modélisation s'imposent comme les catégories conceptuelles principales de l'Instrumentarium, permettant d'aborder à la fois le niveau poiétique et le niveau neutre.

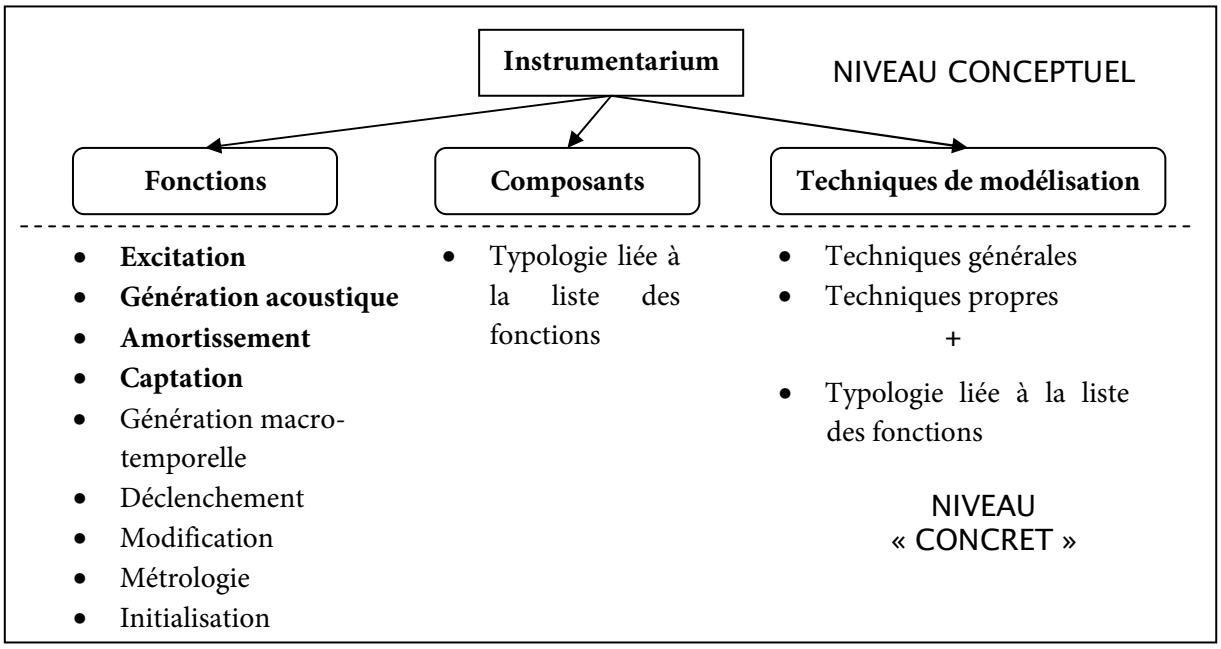


Figure 44 : Organisation conceptuelle partielle de l'Instrumentarium GENESIS

Au niveau « concret », chacune de ces trois catégories peut être subdivisée en sous-catégories ; nous avons déjà évoqué l'existence de neuf types de fonctions (dont les quatre fonctions fondamentales), auxquelles correspondent, comme nous allons le voir dans le chapitre suivant, différents types de composants. Quant aux techniques de modélisation, elles peuvent d'une part être catégorisées selon la fonction qu'elles réalisent, et d'autre part séparées en techniques générales et techniques propres.

La réalisation et l'étude de l'inventaire nous mènent donc à l'organisation globale suivante : dans un modèle, les *fonctions* sont réalisées par un ou plusieurs *composants*, selon des *techniques de modélisation*. A ce schéma simple s'ajoute l'existence des objets remarquables, qui ont le même statut

que les modules élémentaires et qui doivent être documentés avec la même précision en raison de leur utilisation fréquente.

L'étude que nous venons de mener nous a également montré que, à côté des catégories conceptuelles, au moins deux autres aspects très importants devront être abordés dans l'environnement didactique de GENESIS. Tout d'abord, un effort tout particulier devra être consacré à la description des effets de la quantification qui, loin d'être bannis par les utilisateurs, sont mis à profit dans de nombreuses situations et sont complètement intégrés aux processus de création avec GENESIS. Par ailleurs, l'existence de la catégorie « Modèles remarquables » de l'inventaire démontre la nécessité de proposer, dans la librairie de modèles fournis avec GENESIS, un certain nombre de modèles complexes, voire de modèles auteurs, qui serviront à illustrer la diversité des possibilités de modélisation et pourront faire l'objet de description et d'analyses détaillées.

Chapitre 6. Fonctions et composants associés

Ce chapitre est consacré à la définition des fonctions élémentaires des modèles musicaux CORDIS-ANIMA, que nous illustrerons par la présentation d'un certain nombre de composants courants permettant de les réaliser. Ces fonctions ont été identifiées grâce à la constitution de l'inventaire au chapitre précédent. Nous nous étendrons plus longuement sur les fonctions nouvellement identifiées (Génération macro-temporelle, Déclenchement, Modification, Métrologie et Initialisation), les quatre autres ayant déjà largement été abordées au Chapitre 5. Nous décrivons ces fonctions au niveau neutre : il ne s'agit en aucun cas de fonctions musicales. Comme nous l'avons déjà dit, le lien entre le domaine musical et les modèles s'établit au travers des techniques de modélisations.

Nous illustrerons tous les aspects abordés dans ce chapitre à l'aide d'un modèle générique, nommé EXEMPLE, que nous ferons évoluer au fur et à mesure de notre propos ; nous distinguerons ses différentes versions par un suffixe : EXEMPLE-1 correspond à la première version, EXEMPLE-2 à la seconde, etc.

Le modèle EXEMPLE-1 est composé d'une structure acoustique (une Corde de 10 MAS attachée à ses deux extrémités à des SOL) écoutée grâce à un module SOX et excitée par un module MAS $\mathcal{M}_S$ qui la percute via un module BUT purement élastique (Figure 45). Les paramètres du modèle sont récapitulés dans le Tableau 8.

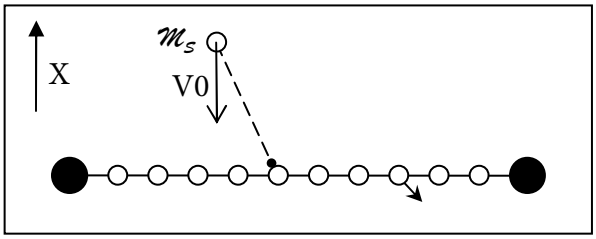


Figure 45 : Le modèle EXEMPLE-1

Tableau 8 : Paramètres et conditions initiales du modèle EXEMPLE-1

Corde	
Modules MAS (40)	
M	1
X0	0
V0	0
Modules SOL (2)	
X0	0
Modules REF	
K	0,01
Z	0,0001

Percuteur élémentaire	
Module MAS	
M	1
X0	0,1
V0	-1
Module BUT	
K	0,01
Z	0
S	0

1. Excitation

Comme nous l'avons dit précédemment, l'excitation d'une structure est soit interne à celle-ci, soit externe. Dans le deuxième cas, il existe un composant, appelé *excitateur*, qui transmet de l'énergie de la structure source à la structure excitée.

Un excitateur produit une excitation lorsque l'ensemble formé par le composant source et la structure excitée se trouve dans un état particulier, que ce soit à un instant donné de la simulation, ou sur une certaine durée non négligeable à l'échelle macro-temporelle. Dans les cas les plus simples (cf. Section 1.1), la « détection » de cet état et la transmission de l'énergie sont réalisés par un simple module <LIA> ; dans les cas plus complexes, chacune de ces deux fonctions est réalisée par un sous-composant distinct (cf. Section 1.2).

1.1. Les excitateurs simples

Un *excitateur simple* est constitué de deux éléments :

- Un module <MAT> $\mathcal{M}_s$ qui, au moment de l'excitation, a une vitesse non nulle par rapport à la structure excitée. C'est la source d'énergie.
- Un module <LIA> $\mathcal{L}_\varepsilon$, connecté à $\mathcal{M}_s$ et à un module <MAT> $\mathcal{M}_\ell$ de la structure excitée, qui assure la transmission d'énergie entre les deux.

Plusieurs modules <LIA> peuvent éventuellement relier $\mathcal{M}_s$ et la structure excitée : c'est ce que nous avons appelé la technique de l'excitation « macroscopique » (cf. p. 173).

Pour une excitation macro-temporelle, le module $\mathcal{L}_\varepsilon$ est généralement une liaison non linéaire. Pour une excitation acoustique, il peut également s'agir d'une liaison linéaire.

Le module $\mathcal{M}_s$ peut être un module isolé, comme dans la Figure 45 : on parlera d'*excitateur élémentaire*.[75] Il peut également faire partie d'une autre structure, comme dans la Figure 46. Dans ce cas, l'excitateur assure une transmission directe de l'énergie entre la structure source et la structure cible.

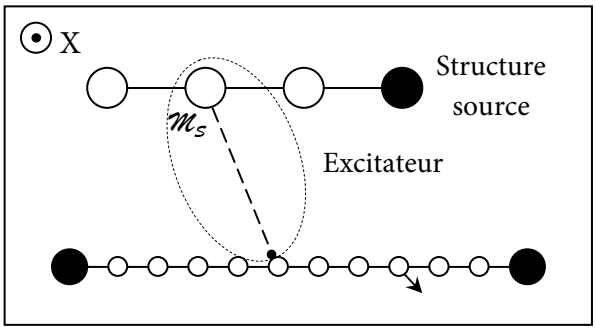


Figure 46 : Excitateur simple intégré à une structure source

On nomme les excitateurs simples en fonction du type d'excitation qu'ils simulent, lorsque cela est possible. Les trois types principaux sont :

[75] « Isolé » ne signifie pas ici que le module n'a aucune interaction en dehors de celle qui le lie au composant excité, mais seulement qu'il ne fait pas partie d'une structure. Il peut ainsi avoir été lui-même excité au préalable.

- les *Percuteurs*, dont le module $\mathcal{L}_\varepsilon$ est un module BUT élastique, le mode de transmission de l'énergie étant alors basé sur la collision avec la structure cible ;
- les ***Archets****, qui simulent le mode d'excitation des instruments à cordes frottées, à l'aide d'une liaison LNL visqueuse ;
- les ***Plectres****, qui simulent le mode d'excitation par pincement, à l'aide d'une liaison LNL élastique.

Dans le modèle EXEMPLE-1, l'excitation est réalisée par un Percuteur élémentaire.

Les Percuteurs et les Plectres réalisent l'excitation en fonction de la position relative de $\mathcal{M}_s$ et $\mathcal{M}_e$. Par exemple, l'excitation par percussion a lieu, par défaut, lorsque les deux modules ont la même position. Au contraire, les Archets réalisent une excitation qui dépend de la vitesse relative des deux modules, dont dépend directement l'intensité du frottement. Ainsi, si cette vitesse est trop élevée, l'excitation n'a pas lieu, la force d'interaction s'annulant au-delà d'un certain seuil.

L'*Amplificateur* est un autre type d'excitateur simple, qui se démarque des précédents par le fait qu'il ne peut apporter d'énergie qu'à une structure déjà en mouvement – il ne peut pas initier un mouvement de lui-même. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- Le module $\mathcal{M}_s$ a une inertie supérieure de plusieurs ordres de grandeur à celle du module <MAT> cible de l'excitation, de sorte que l'interaction $\mathcal{L}_\varepsilon$ soit unidirectionnelle.
- Le module $\mathcal{L}_\varepsilon$ est un module BUT visqueux dont le coefficient Z est négatif. L'activation de l'amplificateur se fait donc en fonction de la position relative de $\mathcal{M}_s$ et $\mathcal{M}_e$ – en général lorsque le premier est en dessous du deuxième.

Tant que l'interaction est active, l'Amplificateur a pour effet d'accélérer le mouvement du module excité, ce qui communique de l'énergie à l'ensemble de la structure et accroit en conséquence son amplitude de vibration globale. Ce gain d'amplitude se fait de façon plus ou moins progressive selon la valeur du coefficient Z ; pour un coefficient faible en valeur absolue (par exemple 10^6 fois inférieure à l'inertie du module excité), l'amplification est très lente. Si $\mathcal{M}_s$ s'éloigne de la structure de sorte que le module BUT n'est plus actif, l'apport d'énergie cesse (Figure 47).

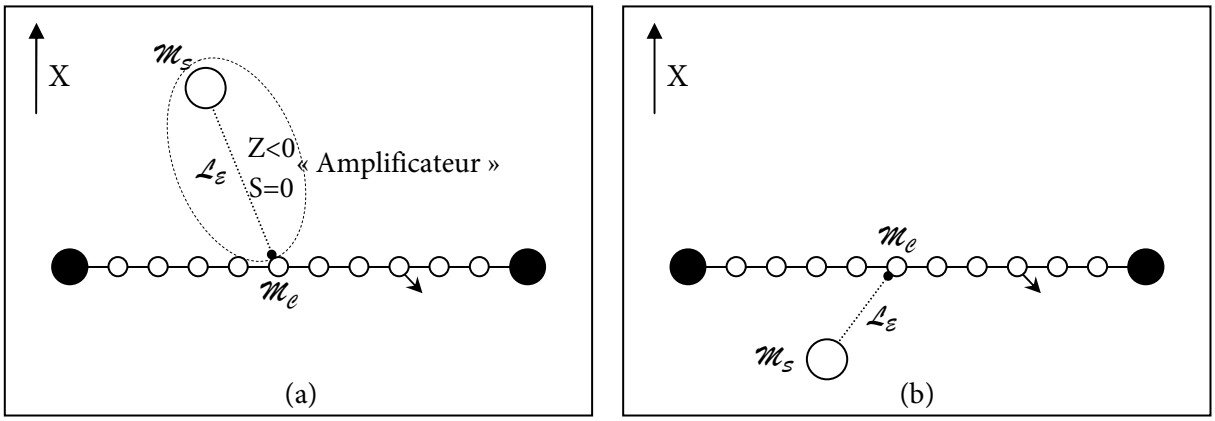


Figure 47 : "L'Amplificateur". (a) Inactif. (b) Actif.

L'Amplificateur est employé pour accroitre ponctuellement l'amplitude de vibration d'une structure (le plus souvent acoustique) ; il est appliqué en particulier sur des structures ayant une longue durée d'amortissement et produisant, par conséquent, des sons continus. Combiné à l'Etouffoir, c'est un outil permettant de gérer les amplitudes de vibration des structures de façon très générale.

En général le module $\mathcal{M}_S$ d'un excitateur est un module mobile (MAS ou CEL). Cependant, il peut aussi s'agir d'un module SOL. Par exemple, le composant LNL+SOL avec une caractéristique LNLK constante non nulle, qui est utilisé dans la technique de la « Pesanteur », peut être considéré comme un excitateur simple.

1.2. Les excitateurs complexes

Il est possible dans GENESIS de réaliser des composants excitateurs plus complexes que ceux que nous venons de présenter. Il s'agit de dispositifs constitués de plusieurs modules <MAT> qui s'intercalent entre la source d'énergie et la structure visée : la transmission d'énergie n'est donc plus directe comme avec les excitateurs simples.

Un excitateur complexe permet de réaliser un découplage entre la structure source et la structure excitée, ce qui n'est évidemment pas possible avec un excitateur simple puisque l'interaction est directe entre les deux. Ce découplage recouvre deux aspects possibles :

- L'état particulier qui doit être atteint pour que l'excitation ait lieu peut ne concerner que le composant source et non plus les deux composants.
- L'énergie transmise à la structure excitée peut être fixée de façon arbitraire par rapport à l'énergie du composant excitateur. En particulier, cette énergie peut être « normalisée », ce qui signifie qu'elle sera toujours la même à chaque occurrence d'une excitation.

Penchons nous sur le premier aspect. Dans le cas le plus simple, l'état à détecter porte sur un seul module <MAT> ($\mathcal{M}_S$) de la structure source ; il peut concerner sa position, sa vitesse ou son accélération (voire, en théorie, une combinaison de ces grandeurs, bien que cela ne semble *a priori* utile que dans des cas extrêmement particuliers). Par exemple, on peut imaginer un excitateur qui produit une excitation lorsque le module $\mathcal{M}_S$ atteint une accélération A=1 $m.s^{-2}$, lorsqu'il atteint la position X = 0,1, ou encore lorsqu'il est au repos depuis exactement 2 secondes. Si on considère des états concernant plusieurs modules <MAT>, les possibilités deviennent innombrables.

Pour réaliser le découplage, il faut que la détection de l'état et la transmission de l'énergie (qui correspondent à deux fonctions élémentaires, respectivement la Métrologie (cf. Section 8) et l'Excitation soit réalisées par deux sous-composants : un *Détecteur* et un Excitateur simple (Figure 48). En effet, ce type de composant est, *in fine*, le seul moyen de transmettre de l'énergie « de l'extérieur ». Nous nous intéresserons aux Détecteurs dans la section de ce chapitre consacrée à la Métrologie (p. 211) ; quant aux excitateurs simples, nous venons de les évoquer.

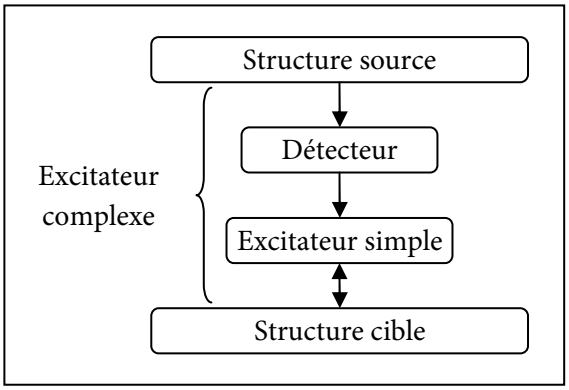


Figure 48 : Décomposition d'un excitateur complexe en deux sous-composants : un détecteur et un excitateur simple.

Notons que la liaison entre ces deux sous-composants n'est pas forcément directe (la seule condition nécessaire étant que la détection d'un état active l'excitateur). Ainsi, on peut imaginer que l'effet de la détection soit « modulé » par un dispositif intermédiaire, permettant par exemple de ne produire une excitation que pour une détection sur deux. Il est également possible qu'un excitateur complexe comprenne une source d'énergie interne, comme c'est le cas pour la Gâchette.

Toute une gamme d'excitateurs complexes, au fonctionnement plus ou moins inspiré de dispositifs réels, est envisageable ; à l'heure actuelle, seul un nombre restreint ont été développés. Parmi ceux-ci, on compte par exemple un composant permettant de réaliser une excitation par percussion normalisée : l'énergie communiquée à la structure cible est la même quelle que soit l'énergie de la structure source.

2. Amortissement

Il y a peu à ajouter à ce que nous avons déjà dit au sujet de l'Amortissement. Les principaux composants réalisant cette fonction sont bien entendu les liaisons visqueuses à coefficient Z positif, qu'ils soient utilisés pour des frottements internes ou externes. A cela s'ajoute l'Etouffoir, qui est le composant « opposé » de l'Amplificateur : les deux diffèrent en effet uniquement par le signe du coefficient de viscosité de la liaison BUT.

3. Génération acoustique

3.1. Structures acoustiques primaires et secondaires

Nous avons déjà largement abordé la fonction Génération acoustique ; nous avons en particulier étudié les conditions pour qu'une structure produise des vibrations acoustiques, et proposé une classification simple des structures acoustiques, fondée sur la nature, linéaire ou non, de leurs liaisons élastiques internes.

On peut également distinguer les structures acoustiques en fonction de leur mode d'excitation : une structure acoustique sera dite *primaire* si elle subit une excitation macro-temporelle, et *secondaire* si elle subit une excitation acoustique. Cette classification est fondée sur le contexte d'utilisation et non sur la nature de l'objet : toute structure acoustique peut être primaire ou secondaire (voire les deux à la fois) selon ses interactions avec d'autres composants.

Structures primaires et secondaires ont la même fonction au niveau neutre : la production de vibrations acoustiques. En revanche, au niveau poiétique, leurs rôles peuvent être très différents, d'où l'intérêt de cette distinction.

Commençons par comparer ces deux catégories avec le domaine instrumental. La structure vibrante d'un instrument correspond, selon la définition donnée ci-dessus, à une structure primaire, car elle est mise en mouvement par le geste de l'instrumentiste, par le biais d'une excitation macro-temporelle. Le résonateur d'un instrument, quant à lui, correspond à une structure secondaire puisque les vibrations lui sont communiquées par la structure vibrante (éventuellement *via* un composant intermédiaire, comme le chevalet), ce qui constitue une excitation acoustique. Il est clair que ces deux parties de l'instrument n'ont pas la même fonction : la structure vibrante produit le son, tandis que le résonateur a pour fonction de l'amplifier et de le diffuser, tout en lui donnant une « couleur » particulière.

La situation est évidemment différente dans GENESIS, étant donné que les vibrations d'une structure ne se propagent pas dans un milieu – à moins que celui-ci ne soit explicitement modélisé. Les

structures secondaires n'ont donc pas pour rôle de rendre audible les vibrations de la structure primaire. En revanche, elles peuvent effectivement être utilisées pour colorer le son, même si ce n'est pas là leur seule utilité, comme nous allons le voir.

Par rapport à la typologie Brutel, la notion de structure primaire est équivalente à l'ancienne notion de « Structure vibrante », tandis que la notion de structure secondaire généralise celle « d'Environnement ». Cette nouvelle terminologie s'affranchit de la référence aux instruments traditionnels, tout en englobant les possibilités de modélisation qui y sont liées : une structure secondaire peut aussi bien être utilisée pour modéliser une table de résonance (c'est-à-dire un « environnement local » dans l'ancienne terminologie) que pour produire des résultats qui ne correspondent à aucun phénomène physique réel.

3.2. Rôle des structures acoustiques secondaires

Pour comprendre le rôle des structures acoustiques secondaires, il faut examiner les deux types d'interactions possibles entre la structure primaire et la structure secondaire : le couplage et l'interaction unidirectionnelle.

3.2.1. Couplage

Ce type d'interaction se distingue par l'importante influence mutuelle des deux structures – qui, rappelons-le, sont situées à la même échelle d'inertie. Bien sûr, c'est la structure primaire qui commence par communiquer de l'énergie à la structure secondaire, mais des échanges énergétiques peuvent ensuite avoir lieu dans les deux sens. Au sens strict du terme, il y a bien une excitation acoustique, mais il est plus pertinent de considérer l'ensemble des deux structures couplées comme une « macrostructure » dont la fonction est la Génération acoustique (ceci n'empêchant pas l'on obtienne des sons nettement distincts selon qu'on écoute l'une ou l'autre des deux structures couplées, lorsque celles-ci sont très différentes).

Au niveau poiétique, le couplage d'une structure primaire et d'une structure secondaire est une technique de *composition de structures*. Elle permet, en quelque sorte, d'hybrider des structures acoustiques afin de produire des sons présentant certaines caractéristiques provenant de l'une et de l'autre.

Le modèle EXEMPLE-2 illustre cette situation (Figure 49). Nous ajoutons au modèle précédent une structure acoustique secondaire : une Corde maracassée comportant 10 modules MAS, dont les paramètres et conditions initiales sont donnés dans le Tableau 9. Les deux structures sont couplées par un module RES $\mathcal{R}$ de raideur K=0,001.

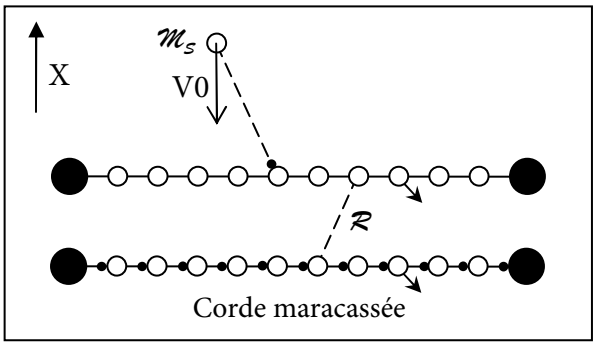


Figure 49 : Le modèle EXEMPLE-2 ; ajout d'une structure acoustique secondaire (Corde maracassée)

Tableau 9 : Paramètres et conditions initiales de la Corde maracassée du modèle EXEMPLE-2

Corde maracassée	
Modules MAS (40)	
M	1
X0	0
V0	0
Modules SOL (2)	
X0	0
Modules REF	
K	0,01
Z	0,0001
S	0

Plus le couplage est faible et plus la rétroaction de la structure secondaire sur la structure primaire est faible. En outre, l'amplitude des oscillations de la structure secondaire diminue dans le même temps. Si l'on veut écouter les deux structures simultanément, il faut donc le faire grâce à des composants RES+SOF ou FRO+SOF, qui permettent d'ajuster (par le biais du coefficient de raideur ou de viscosité) les amplitudes relatives de chaque signal capté.

3.2.2. Interaction unidirectionnelle

Dans le cas où l'interaction entre les deux structures est unidirectionnelle (cf. p. 144), la structure primaire se comporte comme si elle était isolée – ce qui n'est bien sûr pas le cas de la structure secondaire.[76] On peut alors considérer la structure secondaire comme un *filtre* dont le signal d'entrée est la position $X_1(n)$ du module $\mathcal{M}_1$ ou la force $F_{1,2}(n)$ et la sortie S(n) est le signal capté, quelle que soit la technique utilisée pour cela (Figure 50). Il est en effet facile de montrer que tout réseau CORDIS-ANIMA utilisé de cette façon est équivalent à un filtre à réponse impulsionnelle infinie, linéaire ou non linéaire selon le type des modules <LIA> présents dans la structure. Contrairement au cas du couplage, la fonction des deux structures n'est alors pas la même : la structure secondaire réalise un type particulier de Génération acoustique, qu'on peut nommer « Transformation acoustique ». En effet, le son qu'elle va produire va être le résultat du filtrage du signal d'entrée.

Il n'entre pas dans nos objectifs de décrire l'ensemble des possibilités de Transformation acoustique : elles font l'objet de travaux dédiés, menés par Alexandros Kontogeorgakopoulos [Kontogeorgakopoulos&Cadoz 2007a ; 2007b ; Kontogeorgakopoulos 2008]. Contentons-nous de donner quelques indications générales.

[76] La structure secondaire peut avoir soit la même échelle d'inertie que la structure primaire (ce qui implique que ses oscillations seront d'une échelle inférieure), soit une échelle d'inertie inférieure. Dans ce deuxième cas, il est possible que l'échelle d'amplitude de la structure secondaire soit la même que celle de la structure primaire, ce qui rend plus aisée la Captation simultanée de leurs mouvements.

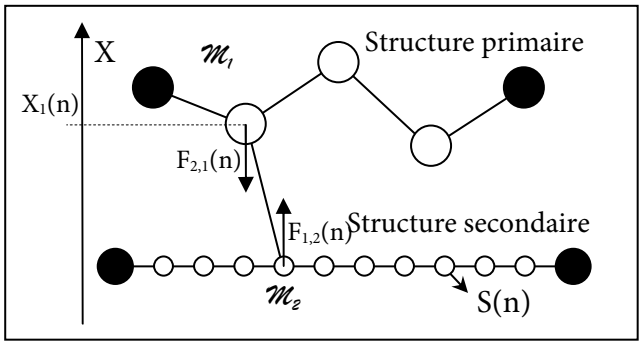


Figure 50 : Interaction unidirectionnelle entre une structure acoustique primaire et une structure acoustique secondaire. Le « signal de sortie » S(n) est capté par un module SOX.

Le terme *filtrage* ne doit pas être pris ici uniquement dans le sens usuel d'atténuation de certaines bandes de fréquence du signal d'entrée. En effet, lorsque la structure secondaire n'est pas linéaire, la transformation qu'elle va faire subir au signal d'entrée peut correspondre à une distorsion complexe du signal (avec introduction de composantes fréquentielles n'apparaissant pas dans ce dernier), à laquelle peut s'ajouter un filtrage classique.

Une structure secondaire linéaire se comporte comme à un filtre en peigne, résonnant ou non selon la viscosité des liaisons internes, donc chaque pic est centré sur un des ses modes de vibration propre. Un cas particulier est celui de la Cellule, qui n'a qu'un mode de vibration est correspond à un simple filtre passe-bande. Lorsque sa viscosité est faible, une telle structure peut être considérée comme un résonateur ; elle permet par exemple de modéliser des tables de résonance, ou les réverbérations analogiques à ressort ou à plaque (respectivement en utilisant un Chapelet ou une Membrane).

De plus, si on applique une Modification à la structure secondaire, il est possible de réaliser des transformations dynamiques du son. Ainsi, un effet de type « Wah-Wah » a pu être modélisé grâce à une Cellule non linéaire [Kontogeorgakopoulos&Cadoz 2005].

4. Captation

Dans la section du Chapitre 4 consacrée à la Captation, nous avons déjà largement abordé les composants liés aux différentes techniques de captation des mouvements. Nous récapitulons ces techniques dans le Tableau 10.

Dans les modèles EXEMPLE-1 et EXEMPLE-2, la captation est réalisée de façon directe par deux modules SOX placés sur les structures acoustiques.

Il faut ajouter à cette liste les composants utilisant les interactions non linéaires, BUT ou LNL qui sont peu utilisés et réalisent, en plus de la Captation, une distorsion du signal par rapport à celui qu'on obtiendrait en Captant le mouvement avec une interaction linéaire.

Evoquons, pour finir, l'existence de composants de Captation, relativement complexes et encore à l'état expérimental, qui permettent de réaliser une *captation à gain variable* – et donc de spatialiser un son si on utilise plusieurs canaux simultanés pour écouter le même mouvement.

Tableau 10 : Techniques et composants de Captation

Technique	Principaux composant associés
Captation directe	Module SOX
Captation de sources multiples	RES+SOF FRO+SOF Chevalet+SOX Oreilles
Captation de sources mobiles[77]	FRO+SOF RES^{+}+SOF+RES^{-} FRO^{+}+SOF+FRO^{-}

5. Génération macro-temporelle

Cette fonction est la contrepartie, à l'échelle macro-temporelle, de la fonction « Génération acoustique » : il s'agit donc de la production de mouvements ne se situant pas dans le domaine acoustique, c'est-à-dire de mouvements non oscillatoires ou de mouvements oscillatoires dont le spectre n'est pas situé dans le domaine audible.

Une structure sera appelée *générateur macro-temporel* lorsque au moins l'un de ses modules a un tel mouvement.[78] L'exemple le plus simple de générateur macro-temporel est un module MAS lancé à une certaine vitesse ; c'est le cas du Percuteur de EXEMPLE-1 et EXEMPLE-2.

Introduisons maintenant le modèle EXEMPLE-3 (Figure 51). Le Percuteur élémentaire est supprimé ; on le remplace par un générateur macro-temporel : une Cellule non amortie dont la fréquence d'oscillation est F=1 Hz. Le module MAS $\mathcal{M}$ de la Cellule est relié à la Corde par un module BUT élastique ; ils forment donc ensemble un nouveau Percuteur, non élémentaire, cette fois. Ajoutons que le module $\mathcal{M}$ a une inertie $M=10^6$, très supérieure à l'inertie du module percuté (M=1), de sorte que l'interaction réalisée par le module BUT est unidirectionnelle.

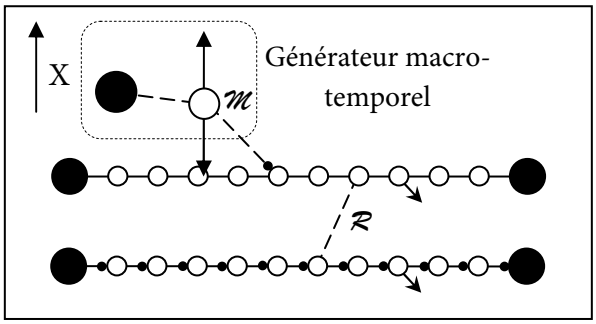


Figure 51 : Le modèle EXEMPLE-3 ; ajout d'un générateur macro-temporel (une Cellule)

[77] La notation RES^{+}, RES^{-} (resp. FRO^{+}, FRO^{-}) désigne le fait que les deux modules ont des coefficients de raideur (resp. de viscosité) opposés.

[78] On utilisera, de même, l'expression *structure macro-temporelle* pour une structure vérifiant les mêmes conditions.

Le mouvement libre du module $\mathcal{M}$ du module EXEMPLE-3 est une oscillation sinusoïdale – on néglige pour l'instant le moyen utilisé pour le mettre en mouvement. Si l'amplitude de celle-ci est suffisante, $\mathcal{M}$ va percuter la Corde toutes les secondes ; ce faisant, il lui transmet une partie de son énergie et réalise donc une excitation. Le son produit par le modèle sera donc une succession d'évènements sonores régulièrement espacés.

5.1. Génération macro-temporelle et gestes instrumentaux

Cadoz [Cadoz 1999a], dans son analyse des gestes instrumentaux, introduit la typologie suivante :

- Le *geste d'excitation* apporte de l'énergie à la structure vibrante de l'instrument : percussion d'un tambour avec les mains ou à l'aide de baguettes, enfoncement des touches de piano, souffle dans l'embouchure d'un instrument à vent, etc.
- Le *geste de modification* modifie temporairement les propriétés de l'instrument (le plus souvent celles de la structures vibrante). Parmi les nombreux exemples possibles, citons l'appui du doigt sur la corde du violon ou la fermeture des trous d'un instrument à vent, qui permettent tous les deux de changer la hauteur du son, ou encore l'étouffement des cordes de la guitare avec la pulpe de la main, qui affecte le timbre et la durée d'amortissement.
- Le *geste de sélection* est préalable aux précédents : il correspond au choix de l'action d'excitation ou de modification qui va être effectuée. Ainsi, le guitariste sélectionne la corde qu'il va pincer et les cases du manche sur lesquelles il va appuyer ; la pianiste place ses mains au-dessus des touches qu'il va enfoncer ; le joueur de *steel drum* utilisant plusieurs tambours pivote sur lui-même afin de se placer en face de celui dont il va jouer. Tous ces choix se traduisent par des mouvements du corps, de plus ou moins grande amplitude selon la taille de l'instrument ou de l'ensemble instrumental. Ces gestes ont pour point commun d'être réalisés sans aucun contact avec l'instrument.

Cette typologie est également valide dans GENESIS, même si on utilisera le terme *mouvement* (d'excitation, de modification ou de sélection) à la place de *geste*, afin d'éviter une référence explicite au monde des instruments acoustiques qui risquerait d'introduire certaines confusions. Tout d'abord, les gestes produits par l'homme appartiennent à des échelles physiques précises (tant du point de vue de la vitesse pure que de la fréquence), plus étroites que celles pratiquées dans GENESIS. Aucun geste humain n'atteint une vitesse aussi élevée que 1 $km.s^{-1}$ ou une fréquence aussi basse que 0,001 Hz, alors que de tels ordres de grandeur sont tout à fait courants dans les modèles. De ce point de vue, les possibilités offertes par la modélisation outrepassent largement celles de notre corps. A l'inverse, nommer « geste » le mouvement d'un module MAS ou CEL, aussi complexe soit-il, réduirait de façon pour le moins brutale le geste instrumental à une simple trajectoire, occultant son infinie richesse, issue d'un long apprentissage. Enfin, notons que, contrairement au geste instrumental, le mouvement produit par un générateur macro-temporel ne s'applique pas nécessairement à un « instrument » (c'est-à-dire à une partie du modèle située à l'échelle acoustique) : il peut très bien agir à son tour sur un autre générateur macro-temporel.

Aussi la notion de geste dans le contexte GENESIS doit-elle rester une simple métaphore – dont l'utilité ne fait cependant aucun doute dans un cadre pédagogique.

Un générateur macro-temporel n'est pas, par nature, destiné à produire un type de mouvement particulier. Il réalisera une excitation, une modification ou une sélection selon la façon dont il est

connecté à d'autres composants.[79] Ainsi, la Cellule du modèle EXEMPLE-3 réalise un mouvement d'excitation parce qu'elle est liée à la Corde par un Percuteur. Si on remplaçait celui-ci par un Etouffoir – il suffit pour cela de changer les paramètres du module BUT de façon à ce que l'interaction soit uniquement visqueuse, avec, par exemple, K=0 et $Z=10^{-3}$ – elle réaliserait un mouvement de modification, correspondant à la fonction Amortissement.

Lors de l'analyse de l'inventaire, nous n'avons rencontré que très peu de mouvements de sélection, c'est-à-dire de mouvements permettant de changer la « cible » sur laquelle agit un composant donné. Dans le monde réel, les gestes de sélection correspondent le plus souvent à des déplacements dans une direction orthogonale aux gestes d'excitation ou de modification. Par exemple, la sélection d'une touche de piano s'effectue selon l'axe horizontal, tandis que l'excitation se fait par un mouvement le long de l'axe vertical, de haut en bas. En raison de l'espace unidimensionnel utilisé dans GENESIS, tous les types des mouvements s'effectuent selon le même axe. Pour cette raison, les mouvements de sélection sont relativement délicats à réaliser. Ils ne peuvent pas être modélisés en référence directe au domaine instrumental. Des solutions simples existent dans certains cas mais aucune étude générale n'a encore été menée sur le sujet. Par exemple il est facile de réaliser un modèle dans lequel un générateur macro-temporel pince successivement plusieurs Cordes, cf. Figure 52). Celles-ci doivent être attachées à des positions différentes ; on déplace alors le générateur (dont la position est commandée par un autre composant, qui réalise le mouvement de sélection) de façon à ce qu'il se trouve en face de la Corde souhaitée. Mais cette solution ne fonctionne pas si on remplace les Plectres par des Percuteurs : la Corde du bas est, par exemple, de peut pas être percutée sans qu'il n'y ait d'interaction avec les autres.

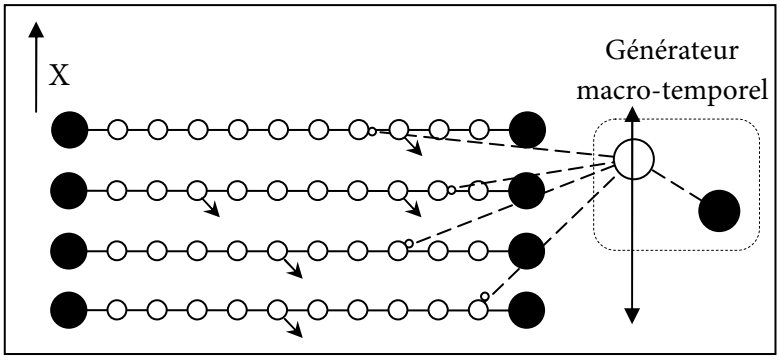


Figure 52 : Pincement de plusieurs cordes par un seul générateur macro-temporel.

Même si ce cas n'a pas été observé très couramment au cours de la réalisation de l'inventaire, il est possible qu'un Générateur macro-temporel soit connecté à des composants réalisant des fonctions de nature différente ; il peut, par exemple, participer à la fois à l'excitation et à l'amortissement d'une structure, tout comme la main du percussionniste peut aussi bien frapper la peau que bloquer ses vibrations. Il arrive également, de façon plus fréquente, qu'un Générateur macro-temporel soit connecté à plusieurs composants réalisant la même fonction. Par exemple, un Serpent peut être utilisé pour exciter, à l'aide d'Archets, plusieurs structures acoustiques.

[79] On aura noté, en effet, que deux composants peuvent avoir des modules en commun. Par exemple, lorsqu'un générateur macro-temporel percute une structure via une liaison BUT, le module MAS du générateur auquel cette dernière est connectée fait en même temps partie du Percuteur.

5.2. Rôle dans la création musicale

Un générateur macro-temporel seul ne fait que produire des mouvements ; c'est en le liant à d'autres composants qu'il participe à la réalisation d'une ou plusieurs fonctions. Ce faisant, il contribue à la structure sonore ou musicale du résultat produit par le modèle, à l'échelle macro-temporelle. Par exemple, couplé à une structure acoustique via un excitateur ou un étouffoir, il va être à l'origine d'un ou plusieurs sons, comme c'est le cas dans les modèles EXEMPLE-1 à EXEMPLE-3. C'est l'utilisation la plus courante d'un générateur macro-temporel, mais il peut également être lié à n'importe quel composant réalisant l'une ou l'autre des fonctions élémentaires GENESIS et provoquer des effets extrêmement variés : altération du timbre ou arrêt du son *via* un étouffoir, altération des propriétés (fréquence, modes de vibrations) d'une structure via un dispositif modificateur (cf. Section 7), changements du rythme ou de l'amplitude, etc.

Il est plus aisé de donner des exemples de générateurs agissant sur une structure acoustique : cela correspond à la situation où l'on modélise un instrumentiste ou, plus exactement, les actions de celui-ci. Mais insistons encore une fois sur le fait qu'il peut en être autrement : les modèles complexes intègrent plusieurs niveaux dont chacun comporte des générateurs macro-temporels agissant sur ceux des autres niveaux. Nous illustrons cette possibilité avec le modèle EXEMPLE-4 : dans cette nouvelle version, le module SOL de la Cellule est remplacé par un module MAS $\mathcal{M}_2$ d'inertie $M=10^{12}$. Cette inertie est suffisamment importante par rapport à celle de $\mathcal{M}$ pour que le comportement de l'ensemble reste celui d'une Cellule. $\mathcal{M}_2$ fait partie d'une deuxième Cellule (que nous nommerons Cellule 2) dont la fréquence d'oscillation est F_2=0,1 Hz (Figure 53).

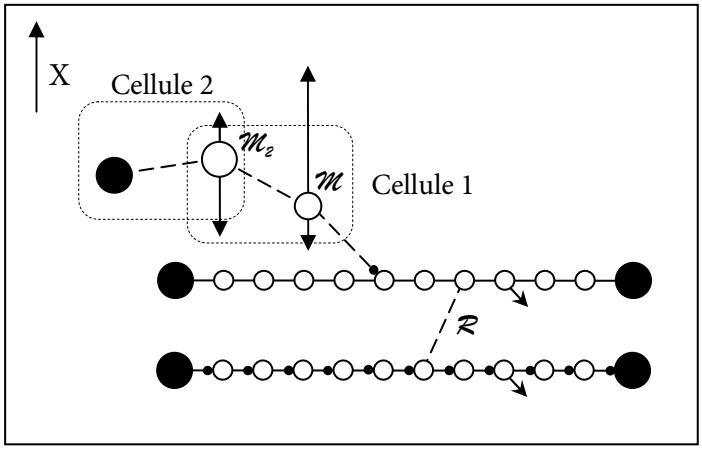


Figure 53 : Le modèle EXEMPLE-4 ; ajout d'un deuxième générateur macro-temporel à une échelle fréquentielle différente.

Par rapport à $\mathcal{M}$, $\mathcal{M}_2$ est un point d'attache mobile. Dans le référentiel de celui-ci, le mouvement de $\mathcal{M}$ est toujours une oscillation sinusoïdale. Mais cette oscillation peut se décaler de haut en bas au grès des mouvements de $\mathcal{M}_2$, ce qui va faire varier l'excitation de la Corde. Lorsque $\mathcal{M}_2$ est au plus haut, $\mathcal{M}$ ne peut plus atteindre la Corde ; lorsqu'il est au plus bas, l'interaction avec la Corde sera au contraire plus violente. L'ajout d'un générateur macro-temporel, la Cellule 2, entraîne donc une évolution de la production sonore du modèle : la séquence des évènements sonores produits varie en intensité et peut même s'interrompre momentanément. Cette évolution a un période de 10 secondes et se place dont à une autre échelle fréquentielle que celle du processus de percussion, qui a un période de 1 seconde. Le nouveau générateur superpose donc une *forme* macro-temporelle (alternance de *crescendos* et de

decrescendos) à la séquence régulière qu'on obtenait avec le modèle EXEMPLE-3, engendrant une nouvelle structure musical plus riche que précédemment.

On peut appliquer sur autant de niveaux qu'on le souhaite la technique consistant à contrôler un générateur macro-temporel à l'aide d'un autre ou, plus généralement, à les faire interagir. Il est clair qu'on est susceptible d'obtenir de cette manière des structures musicales de n'importe quelle complexité. Mais ce principe a une limite simple : plus le nombre de niveaux mis en jeu est élevé et plus l'obtention d'un résultat donné est délicate. Le modélisateur doit ici trouver un compromis adéquat entre com-position et génération.

C'est bien, en effet, la question du rapport entre ces deux processus de création qui est posée par l'utilisation de générateurs macro-temporels. Les générateurs non oscillatoires, particulièrement ceux constitués d'un seul module MAS lancé (comme le Percuteur du modèle EXEMPLE-1), engendrent, en interagissant avec d'autres composants, un nombre limité d'évènements[80] dont on peut généralement déterminer à l'avance la date d'occurrence et les propriétés. Ces évènements sont par exemple liés au fait que le module MAS atteint une position ou une vitesse donnée. L'utilisation d'un tel composant correspond au processus de création par com-position, puisqu'il permet au créateur de *décider* explicitement quels évènements vont être produits et à quels moments.

Au contraire, les générateurs oscillatoires (tels la Cellule du modèle EXEMPLE-3), peuvent engendrer des séquences d'évènements, éventuellement très complexes et susceptibles de se prolonger durant toute la simulation du modèle. Dans ce cas, le créateur *n'écrit pas* la séquence d'évènement produite. Il se « contente » de concevoir le processus qui va l'engendrer : il s'agit donc d'une approche de création par génération. Cette séquence peut être prévisible – c'est souvent lorsqu'on utilise une Cellule – ou non : certains générateurs ont même un comportement trop complexe pour être calculé. Dans ce cas, le créateur ne peut qu'agir sur les propriétés globales du comportement et donc sur celles de la séquence générée. C'est sans doute l'une des approches les plus intéressantes à explorer pour la création avec GENESIS, mais aussi l'une des plus exigeantes.

6. Déclenchement

Le Déclenchement est l'action de communiquer de l'énergie, de façon quasi-instantanée, à un composant dont le fonctionnement et les conséquences qui en découlent dans le modèle correspondent à un processus identifié.

D'après cette définition, il est évident que tout déclenchement est une excitation, au niveau physique du modèle. Le Déclenchement peut être vu comme un cas particulier d'Excitation ; nous avons cependant choisi de mettre les deux fonctions au même niveau, en raison des spécificités du Déclenchement au niveau physique et de ses implications particulières du point de vue compositionnel. Le premier point de distinction concerne les caractéristiques temporelles : la transmission d'énergie se fait en un laps de temps très court, tandis qu'une excitation, au sens général, peut avoir lieu sur une durée conséquente – l'excitation par Archet, par exemple, peut s'étaler sur plusieurs secondes. Un déclenchement est donc précisément localisé dans le temps, ce qui le lie fortement à la notion d'*évènement*. A cela s'ajoute le fait que le Déclenchement lance un « processus », de durée et de complexité arbitraires. Nous n'utilisons pas ici ce terme dans un sens strict : nous dirons

[80] Nous utilisons ici le terme « évènement » au sens large, pour désigner des phénomènes aussi différents que le début d'un son, l'altération d'une hauteur ou la variation d'un tempo. La Section 3 du Chapitre 7 sera consacrée à l'étude de la notion d'évènement dans le contexte de GENESIS.

qu'un processus est une suite de phénomènes qui réalise une ou plusieurs fonctions dans le modèle ou, plus généralement, qui présente une certaine unité aux yeux de l'observateur. Un processus ne se définit donc pas de façon complètement objective, c'est-à-dire seulement en fonction du comportement du modèle.[81] Notons, par ailleurs, que le Déclenchement peut concerner un processus d'*Amortissement* (par exemple en mettant en mouvement un Etouffoir) : il n'est donc pas toujours synonyme de gain d'énergie pour le modèle.

La distinction entre les fonctions Excitation et Déclenchement repose donc en partie sur une différence d'approche. La première se réfère au niveau physique (les concepts considérés sont les grandeurs physiques de la Dynamique : position, vitesse, énergie, etc.), tandis que la seconde se place au niveau des évènements, des processus, de l'*information* (« à partir de l'instant de déclenchement t_0, le composant C va remplir sa fonction »). Cela relève d'un point de vue de plus haut niveau sur le modèle.

Dans le modèle EXEMPLE-3, on peut considérer le mouvement de la Cellule et son action sur la corde comme un processus qui engendre une suite de sons. Il existe deux façons de mettre en mouvement le module $\mathcal{M}$. La première est l'excitation par conditions initiales ; dans ce cas, le module se met en mouvement dès le début de la simulation : le créateur n'est donc pas libre de choisir l'instant de début du processus. La deuxième façon de procéder, qui laisse cette liberté, consiste à utiliser un excitateur. En supposant que le créateur veuille avoir la possibilité de choisir précisément les conditions de l'excitation, le plus simple est d'utiliser un Percuteur élémentaire comme excitateur (modèle EXEMPLE-5, Figure 54). D'après ce que nous venons de dire, le Percuteur réalise, au travers de l'excitation de la Cellule, le *déclenchement* du processus de génération des évènements sonores, réalisé par l'ensemble formé de la Cellule, de la Corde et de l'excitateur qui les lie.

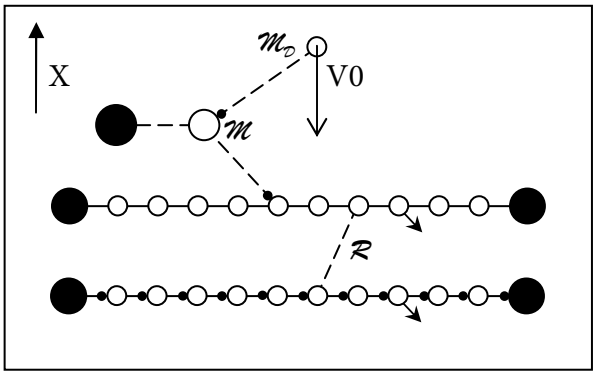


Figure 54 : Le modèle EXEMPLE-5 ; ajout d'un déclencheur élémentaire au modèle EXEMPLE-3

6.1. Déclenchement et composition

Aussi simple soit-il, l'exemple que nous venons de prendre montre clairement l'intérêt de la fonction Déclenchement pour la composition. Le créateur du modèle a choisi d'engendrer une suite régulière d'évènements grâce à l'ensemble formé de la Cellule, de la Corde et de l'excitateur qui les relie. Ce processus produit une structure musicale qui va éventuellement être intégrée à une composition musicale. Pour cela, le créateur doit avoir la possibilité de la placer librement dans le temps et de lui conférer les propriétés désirées. Ces propriétés dépendent de la quantité d'énergie transmise lors de

[81] Cependant, on parlera plus volontiers de processus lorsque des comportements discontinus, pouvant être interprétés comme une succession d'étapes, sont produits.

l'excitation. Dans notre exemple, les caractéristiques de la Cellule et de la Corde étant fixées, la seule variable dépendant de l'excitation est l'amplitude des oscillations de $\mathcal{M}$, qui va déterminer celle des vibrations de la Corde et donc l'intensité des évènements sonores. Dans d'autre cas – par exemple lorsque le composant déclenché n'est pas linéaire – la quantité d'énergie transmise peut également avoir une influence sur d'autres facteurs, comme le timbre, la hauteur ou le rythme.[82] A travers les conditions initiales du Percuteur, ce sont des valeurs musicales ou sonores qui sont représentées. Le Déclenchement est donc directement lié à la notion d'*écriture musicale* – ici, il permet de *composer un processus de génération* avec d'autres processus non représentées dans la Figure 54.

Les phénomènes produits par les processus déclenchés sont de complexité très variable. En déclenchant directement une structure acoustique, on obtient un son, qui correspond plus ou moins directement à la notion de note, soit l'entité musicale la plus simple. A l'autre extrême, il est possible de concevoir des composants se déclenchant en cascade et générant de multiples structures musicales et évolutions sonores, à différentes échelles temporelles. Il est même envisageable qu'un seul déclenchement soit responsable de la mise en mouvement de toutes les parties d'un modèle complexe, même si cela relève plus d'un exercice de style que d'une technique réellement utile : on bénéficie en effet d'une bien plus grande souplesse de composition en déclenchant indépendamment chaque processus d'un modèle.

6.2. Types de déclenchements

La fonction Déclenchement peut être réalisée de deux façons différentes : soit le composant qui la réalise est configuré par l'utilisateur pour s'activer à un moment et avec une énergie directement prédéterminés (ce qu'on appellera un *déclenchement programmé*), soit l'activation a lieu dans des conditions inconnues à l'avance et dépendant du déroulement de la simulation (*déclenchement autonome*). Dans le deuxième cas, cela signifie bien sûr que le composant déclencheur a lui-même été déclenché par un autre composant. Ces deux types de déclenchements correspondent à la distinction entre *composition* et *génération*. L'utilisation d'un déclenchement programmé est un acte d'*écriture*, puisque le créateur décide librement du moment et des propriétés de l'évènement ou de la séquence d'évènement provoqués. A l'inverse, avec le déclenchement autonome, il laisse le modèle « fixer par lui-même » ces paramètres : il s'agit donc d'un processus de génération.

Nous avons dit qu'un déclenchement était réalisé en un laps de temps suffisamment court pour être considéré comme instantané. Pour être tout à fait exact, il nous faut préciser que certains types de déclenchement nécessitent en fait plusieurs étapes, chacune étant effectivement instantanée. C'est le cas pour le déclenchement d'un Domino stationnaire, que nous avons évoqué précédemment. La durée totale du déclenchement ne peut plus, en toute rigueur, être négligée ; cependant, on peut toujours le considérer comme un évènement ponctuel à l'échelle macro-temporelle.

6.3. Les Déclencheurs

Le déclenchement étant une forme d'excitation, n'importe quel excitateur, simple ou complexe, peut jouer le rôle de *déclencheur*. Les deux paramètres primordiaux d'un déclencheur sont, comme nous l'avons vu, l'instant de déclenchement et la quantité d'énergie transmise. Notons qu'un déclencheur

[82] Par exemple, si un Domino stationnaire est utilisé au niveau macro-temporel pour générer une suite de percussions sur une structure acoustique, la quantité d'énergie transmise lors de son déclenchement déterminera le tempo de cette séquence : plus elle est importante, plus ce dernier sera rapide.

complexe peut être constitué d'une série de déclencheurs plus simples liés les uns aux autres ; nous en verrons un exemple p. 212.

On appelle *Déclencheur élémentaire* un Excitateur élémentaire utilisé pour réaliser le Déclenchement.

Le Percuteur purement élastique (à coefficient de viscosité nul) est de loin le composant le plus utilisé pour réaliser un déclenchement programmé, car il permet de contrôler directement les paramètres que nous venons de nommer. Tout d'abord la condition de déclenchement est très simple, puisqu'elle correspond au fait que le module MAS du déclencheur atteint la position $X_D=X_C+S$ (où X_C est la position du module cible et S le seuil du module BUT du Percuteur). En outre :

- La quantité d'énergie transmise – qu'on aborde le plus souvent sous l'angle de la vitesse après déclenchement du module visé par le déclenchement– est aisément calculable grâce à la théorie de chocs dans GENESIS, qui est complètement maitrisée. Il suffit de choisir l'inertie du Percuteur, en fonction de celle du module visé, et sa vitesse initiale.
- Le module MAS du Percuteur est libre tant que la collision n'a pas eu lieu, son mouvement est donc uniforme pendant toute cette phase. Par conséquent, il est très facile de déterminer l'instant de déclenchement, en choisissant la position initiale du Percuteur en fonction de sa vitesse initiale et de la position du module visé. Par ailleurs, l'interaction entre le module déclencheur et le module visé peut être rendue quasi-instantanée (cas d'un choc « dur ») en choisissant correctement le coefficient de raideur du module BUT du Percuteur.

6.4. Fonctionnalités de GENESIS liées au Déclenchement

GENESIS intègre, dans la fenêtre « Conditions Initiales », une fonctionnalité permettant de calculer la position initiale d'un module déclencheur en fonction de sa vitesse initiale et de l'instant de déclenchement souhaité. Plus précisément, cet instant de déclenchement, appelé T0 dans l'interface, est le moment où le module atteindra la position X=0 (on suppose qu'il n'est soumis à aucune force). Cette fonctionnalité n'est donc utilisable directement que pour des déclencheurs qui s'activent effectivement a ce moment précis. Pour un Percuteur élémentaire, c'est le cas si on a $X_D = 0$, soit pour $S = -X_C$. Ce système pourrait être amélioré pour le rendre plus général, en laissant par exemple à l'utilisateur la possibilité de fixer la position de déclenchement.

Par ailleurs, l'outil « Gestion des ensembles » permet de créer un ensemble de modules MAS ou CEL nommés Déclencheurs. Cet ensemble est ensuite utilisé dans le Séquenceur, qui permet de modifier de façon graphique ou textuelle les conditions initiales des modules. L'utilisateur a la possibilité de changer l'instant de déclenchement sans toucher à la vitesse initiale – et donc à la quantité d'énergie transmise – ou au contraire de modifier la vitesse initiale sans changer l'instant de déclenchement ; dans les deux cas, la position initiale est recalculée automatiquement. Notons que rien n'impose que les modules de l'ensemble Déclencheur soient des déclencheurs élémentaire, même si c'est pour cette situation que ces fonctionnalités ont été conçues : il peut aussi bien s'agir de modules isolés (sans aucune interaction) que de modules intégrés à une structure acoustique.

6.5. Déclenchement et énergie

Un déclenchement est susceptible de donner lieu à des phénomènes dont le niveau énergétique est beaucoup plus élevé que celui de l'excitation initiale. C'est le cas, par exemple :

- dans la technique de la Gâchette, où un déplacement aussi petit que voulu d'un module MAS, provoqué par déclenchement, entraîne la conversion de son énergie potentielle en énergie cinétique ;
- pour les structures avec excitation interne par viscosité négative : il suffit que le déclenchement provoque un mouvement infinitésimal pour que l'apport d'énergie commence.

Ce découplage entre le niveau d'énergie nécessaire au déclenchement et celui des phénomènes déclenchés évoque immanquablement un mécanisme de *commande*.

6.6. Conclusion sur le Déclenchement

Quel que soit le degré de structuration musicale auquel on se place, de la simple note à la structure musicale longue de plusieurs dizaines de secondes, le Déclenchement est la fonction primordiale pour la composition dans GENESIS. Il permet, grâce à des mécanismes simples comme le Percuteur, de contrôler facilement et précisément le déroulement d'une simulation, c'est-à-dire l'enchaînement des différents processus de génération sonore et musicale. Offrant bien plus de souplesse que l'excitation par conditions initiales, les déclencheurs élémentaires doivent être utilisés aussi systématiquement que possible.

7. Modification

On appelle Modification toute action sur un composant qui change sa structure, ses propriétés ou son comportement sans intervenir directement sur son niveau énergétique : une modification n'est donc ni une excitation, ni un amortissement.

Cette fonction est bien évidemment liée à la notion de *geste de modification* que nous avons déjà évoquée. Elle inclut cependant des actions qui ne sont pas réalisables dans le monde réel, comme la possibilité de transformer dynamiquement une structure en la rompant ou, au contraire, en lui ajoutant de nouvelles parties. La référence au geste de modification éclaire immédiatement l'utilité musicale de la fonction Modification. Sans geste de modification, de nombreux instruments de musique perdraient une grande partie de leur potentiel expressif. Le violon, par exemple, ne serait capable de produire que 4 notes différentes, et les instruments à vent, qu'une seule. Il en est de même dans GENESIS : la Modification permet de transformer dynamiquement le comportement des composants, multipliant ainsi leurs possibilités. Appliquée au niveau acoustique, elle intervient sur la hauteur, le timbre ou l'amplitude des sons ; au niveau macro-temporel, elle fait évoluer les structures musicales produites par les générateurs macro-temporels. En bref, la Modification est essentielle à l'expressivité des modèles GENESIS qui, sans elle, seraient en quelque sorte des « orchestres statiques ».

On distingue trois principaux types de Modifications, que nous allons examiner ci-dessous : la Perturbation élastique, l'Etirement et la Modification structurelle dynamique.[83]

7.1. Perturbation élastique

Une structure subit une Perturbation élastique lorsque l'un de ses modules ($\mathcal{M}_P$) percute un point de butée $\mathcal{B}$ par l'intermédiaire d'un module BUT (Figure 55). Cette interaction a pour effet de faire « rebondir » $\mathcal{M}_P$ sur $\mathcal{B}$. Selon la raideur du module BUT et la vitesse de $\mathcal{M}_P$, celui-ci dépasse plus ou moins la position de $\mathcal{B}$ avant de repartir en sens inverse. Si le module BUT est très raide (son

[83] On pourrait ajouter à cette liste l'Etouffement, s'il n'était pas déjà rattaché à la fonction Amortissement.

coefficient K est de l'ordre de l'inertie de $\mathcal{M}_p$), on peut tout simplement considérer que la « pénétration » est nulle. L'effet de la Perturbation est donc d'empêcher $\mathcal{M}_p$ de dépasser la position de $\mathcal{B}$: elle exerce une limitation en position.

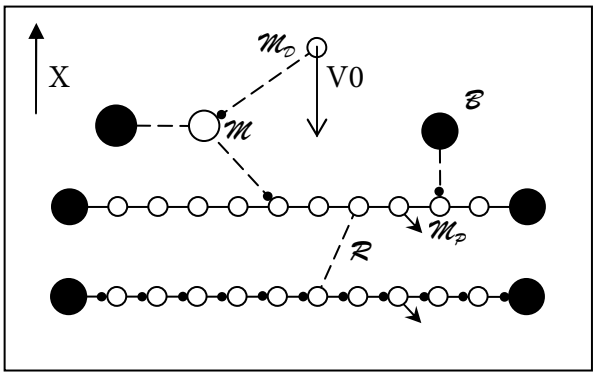


Figure 55 : Le modèle EXEMPLE-6 ; ajout d'une Perturbation élastique de la Corde par un « Doigt »

Soit $\{X_{min}, X_{max}\}$, l'intervalle moyen des positions des modules de la structure en l'absence de toute perturbation. En prenant pour hypothèse le fait que le module BUT est, comme dans la Figure 55, orienté de sorte que la collision ait lieu lorsque $\mathcal{M}_p$ est situé *au-dessus* de $\mathcal{B}$, on peut distinguer deux cas particuliers en fonction de la position de ce dernier :

- Si la position de $\mathcal{B}$ est légèrement inférieure à X_{max}, la Perturbation n'a lieu que ponctuellement, lorsque $\mathcal{M}_p$ a une amplitude d'oscillation importante (Figure 56-a). Le comportement de la structure est globalement peu perturbé ; les modes de vibration ne sont affectés que de façon négligeable. Toutefois, si la structure perturbée est une structure acoustique, les collisions (particulièrement si la Butée est très raide) seront audibles sous la forme d'une série de micro-excitations, la plupart du temps tellement rapprochées qu'elles seront perçues comme une altération du timbre, voire de la hauteur, et non comme des évènements individuels.[84] On peut ainsi modéliser la situation où une corde fortement excitée vient percuter la touche ou les frettes du manche de l'instrument.
- Si la position de $\mathcal{B}$ est inférieure à X_{min}, la Perturbation est permanente, ce qui modifie sensiblement les modes de vibration de la structure, particulièrement s'il s'agit d'une Corde (Figure 56-b). Dans ce cas, celle-ci se retrouve littéralement coupée en deux parties ayant des modes de vibration différents, ce qui renvoie bien sûr au jeu des instruments à cordes.

[84] Il n'y a cependant pas d'Excitation au sens où nous l'avons définie précédemment : ces « micro-excitations » correspondent à une modification du timbre et non à une augmentation de l'amplitude d'oscillation. En effet, la perturbation n'apporte aucune énergie à la structure : elle transfère simple l'énergie de certains modes de vibration à certains autres. Les modes ainsi affectés dépendent de la position du point de contact dans la structure : par exemple, si celui-ci se trouve au milieu de la structure, c'est principalement le mode fondamental qui va perdre de l'énergie au profit des modes d'ordre plus élevé.

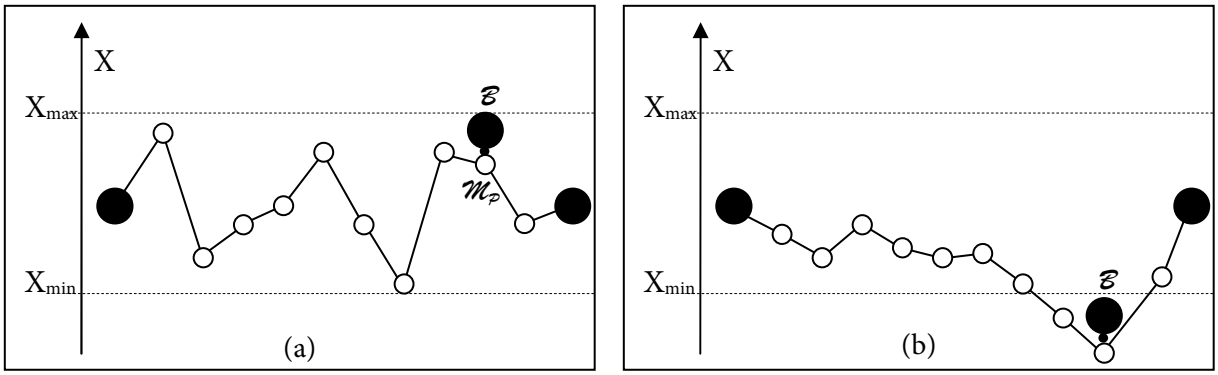


Figure 56 : La Perturbation élastique. (a) Perturbation ponctuelle. (b) Perturbation permanente.

Entre ces deux cas limites, la situation est plus complexe :

- Si le point de butée se trouve au-dessus de la position d'équilibre de la structure, la perturbation disparaît progressivement à mesure que l'oscillation s'amortit. Lorsque l'amplitude est suffisamment faible, la structure est à nouveau libre et retrouve son comportement normal.
- Si le point de butée se trouve au-dessous de la position d'équilibre, on passe progressivement d'une perturbation discontinue ($\mathcal{M}_p$ est, par moments, situé en dessous du point de butée) à une perturbation permanente lorsque l'amplitude devient plus faible

Le point de butée peut être mobile, ce qui permet de « jouer » avec les différentes situations que nous venons de citer au cours de la simulation.

Par analogie à la situation instrumentale réelle, on appelle « Doigt » le composant réalisant la Perturbation élastique : il est constitué d'un point de butée et des liaisons BUT qui le relient à la structure perturbée. Plusieurs Doigts peuvent être utilisés sur une même structure ; on peut de cette façon jouer une suite de notes sur une Corde, en appuyant successivement sur différents modules MAS.[85]

7.2. Etirement

L'Etirement est l'action consistant à déplacer un ou plusieurs points d'attache d'une structure. On peut l'appliquer à toute structure ayant des points d'attache mobiles (modules MAS ou CEL de très grande inertie), mais elle est surtout pertinente pour les structures non linéaires en élasticité, dont elle modifie significativement le comportement. En effet, l'Etirement a pour conséquence d'accroitre la distance moyenne entre les modules <MAT> de la structure. Cela n'a aucun effet sur les structures composée de modules REF ou RES, car la raideur de ces liaisons ne dépend pas de cette distance, contrairement à ce qui peut être le cas avec les interactions LNL (cf. ci-dessous).

L'Etirement est particulièrement utilisée à l'échelle sonore, où il permet d'obtenir plusieurs phénomènes dynamiques intéressants :

- L'Etirement d'une structure composée de modules LNL à élasticité permanente (par exemple, une structure à élasticité en X^3) produit une variation de la hauteur du son dans le cas où toutes les LNL sont identiques, ou une transformation du timbre si les LNL sont différentes. En effet, l'étirement déplace le point de fonctionnement moyen de chaque LNL et modifie

[85] Le Doigt peut être combiné à un module SOL qui modélise la touche d'un instrument à cordes.

donc la raideur de chaque interaction. On peut de cette façon modéliser le phénomène de *tension* d'une structure vibrante [Tache 2004].

- L'Etirement d'une structure maracassée permet de produire un *morphing* entre un timbre bruité et un timbre non bruité, harmonique ou non. Prenons l'exemple d'une Corde maracassée, écoutée grâce à un composant FRO+SOF (Figure 57). Lorsque ses deux points d'attache se trouvent à la même position, cette structure produit un son bruité, dont la couleur dépend de la raideur des modules BUT. En déplaçant vers le point d'attache $\mathcal{M}_A$, on augmente l'espace dans lequel les modules peuvent se déplacer : les interactions se font donc de plus en en plus rares et le son devient progressivement plus « granuleux », jusqu'à n'être plus qu'une succession d'impacts brefs perçus séparément. Au contraire, si l'on déplace $\mathcal{M}_A$ vers le haut, forçant ainsi les interactions à être de plus en plus fréquentes, le son se « densifie » progressivement. A partir d'une certaine position, qui dépend de l'énergie communiquée à la Corde, les liaisons BUT sont actives en permanence et la structure se comporte alors comme une Corde linéaire dont les modules REF auraient les mêmes coefficients de raideur et de viscosité que les modules BUT. On obtient alors un son harmonique ou pseudo-harmonique, selon le nombre de modules MAS. Ainsi, l'Etirement permet ici de transformer radicalement et de façon continue le timbre.

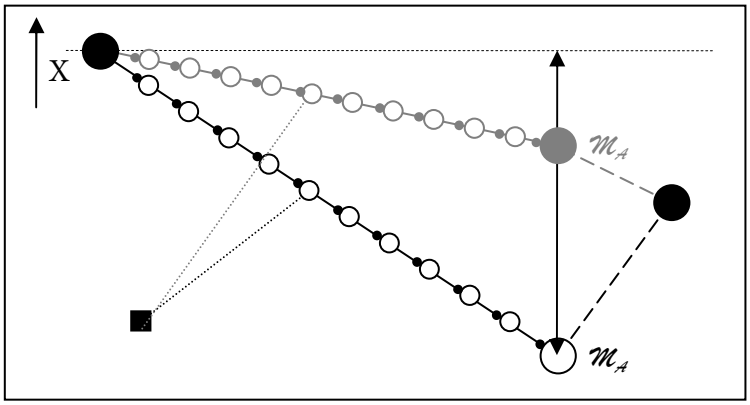


Figure 57 : Etirement d'une Corde maracassée

L'Etirement peut être réalisé de deux façons différentes. Dans la première, le point d'attache est simplement mis en mouvement par ses conditions initiales ou par un Déclencheur ; il n'est alors pas possible de contrôler son mouvement au cours de la simulation. Pour réaliser ce contrôle, il faut que le point d'attache appartienne à une autre structure située à une échelle d'inertie supérieure à celle de la structure étirée. Par exemple, il peut faire partie d'une Cellule, ce qui provoquera un étirement périodique, comme dans la Figure 57. On notera que dans ce cas, le point d'attache fait partie de deux structures différentes en même temps : la structure acoustique, par rapport à laquelle il est un point « fixe », et un générateur macro-temporel.

<u>Remarque</u>
Une structure acoustique étirée doit être écoutée grâce à une technique de Captation de sources mobiles. En effet, l'Etirement provoque un mouvement d'ensemble des modules de la structure qui se superpose à leur oscillation propre.

7.3. Modification structurelle dynamique

7.3.1. Définition

Le principe de la modification structurelle dynamique est d'établir ou d'interrompre, en cours de simulation, une interaction $\mathcal{L}$ entre deux structures (Figure 58). On peut ainsi modifier la structure d'un objet et donc transformer dynamiquement ses propriétés. De façon générale, la connexion d'une nouvelle partie à une structure transforme ses modes de vibration et lui en ajoute de nouveaux.

Les travaux sur la modification structurelle dynamique ont fait l'objet de publications [Tache&Cadoz 2006a ; Tache&Cadoz 2006b], dont la seconde est reproduite en Annexe 3. Cet article détaille tous les aspects techniques de cette fonction. Nous nous contenterons donc dans cette partie d'en évoquer les aspects les plus généraux.

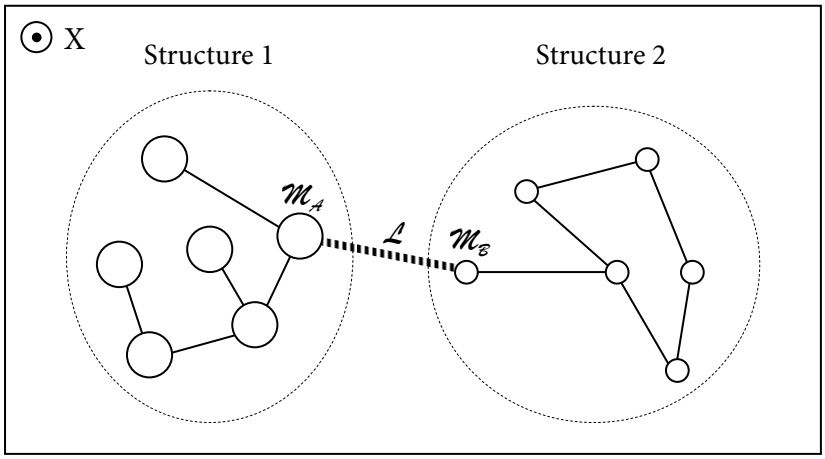


Figure 58 : La Modification structurelle dynamique

On distingue deux cas particuliers de Modification structurelle dynamique :

- La topologie de la structure d'origine est conservée, seule sa taille est modifiée (Figure 59-a). Cela implique évidemment que la partie ajoutée et la structure d'origine ont la même topologie. Le comportement de la structure modifiée ne change pas qualitativement, mais les modes de vibration voient leur fréquence modifiée. Par exemple, si la taille de la structure augmente, la fréquence fondamentale de la structure diminue.
- La topologie de la structure d'origine est modifiée (Figure 59-b). Les modes de vibration sont totalement modifiés ; au niveau acoustique, cela se traduit par une transformation du timbre.

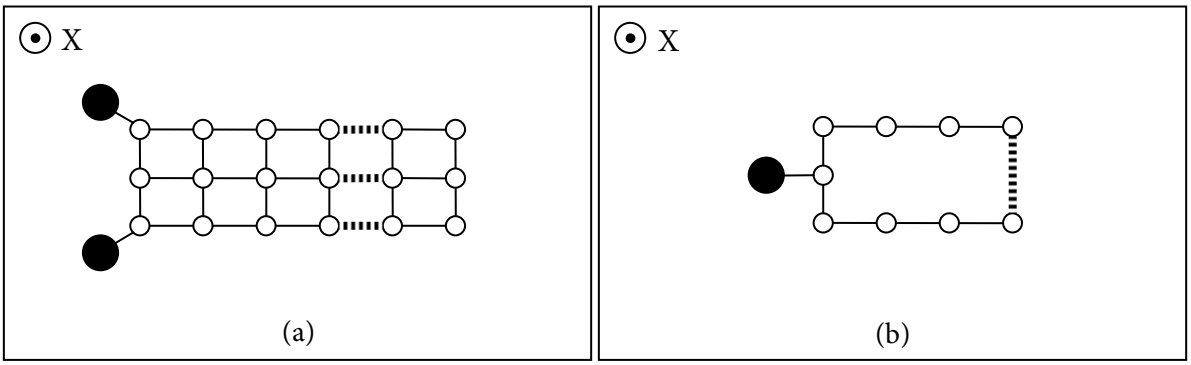


Figure 59 : Modification structurelle dynamique. (a) Augmentation de la taille. (b) Modification de la topologie

Le modèle (St)ring, présenté dans l'article que nous venons d'évoquer, combine ces deux aspects. La structure de départ est un Chapelet attaché à une seule extrémité, qu'on commence par prolonger avec de nouveaux segments ayant les mêmes paramètres ; cela a pour effet de diminuer la fréquence fondamentale de la structure. Puis le dernier module du Chapelet est connecté avec le premier, ce qui change la topologie de la structure, qui devient un anneau. On assiste à ce moment à une transformation du timbre de la structure, qui, de pseudo-harmonique, devient clairement inharmonique.

Notons également que les segments ajoutés à une structure peuvent avoir les mêmes paramètres (inertie ; raideur, viscosité) que celle-ci ou non. Après établissement de la liaison temporaire, on obtient une structure homogène dans le premier cas et hétérogène dans le second.

7.3.2. La Liaison piège

Le composant de base permettant de réaliser la Modification structurelle dynamique est appelé Liaison piège. Il s'agit d'un module LNL élastique, dont la caractéristique LNLK a l'allure illustrée dans la Figure 60. C'est en fait un ressort linéaire doté d'un seuil symétrique (S).

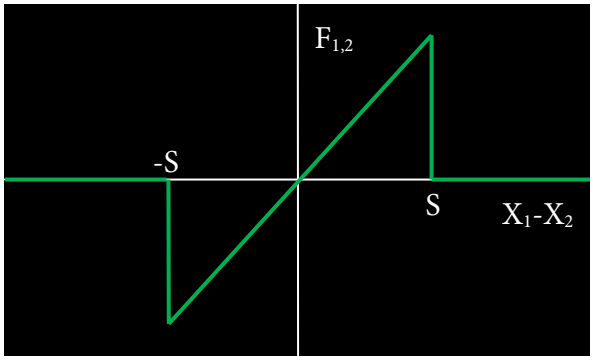


Figure 60 : La caractéristique LNLK du composant liaison Piège

Le comportement de la liaison piège est le suivant :

- Tant que la distance entre $\mathcal{M}_A$ et $\mathcal{M}_B$ est inférieure à S, ils sont indépendants.
- Dès que la distance devient inférieure au seuil, une liaison élastique s'établit entre eux.
- Si les modules sont écartés d'une distance supérieure à S, la liaison se rompt et les deux modules redeviennent indépendants.

Cette liaison temporaire est « fragile », dans le sens où son seuil d'établissement et son seuil de rupture sont les mêmes. Une liaison plus solide nécessite que le seuil de rupture soit supérieur au seuil d'établissement (effet d'hystérésis). Nous présentons dans l'article cité un composant, basé sur la liaison Piège, qui présente de telles propriétés. Nous développons, sur cette base, une technique permettant d'établir n'importe quel type d'interaction (élastique ou visqueuse, linéaire ou non) entre les modules $\mathcal{M}_A$ et $\mathcal{M}_B$.

7.3.3. Applications

Appliquée au niveau acoustique, la Modification structurelle dynamique permet de produire une large gamme de transformations des propriétés du son, puisqu'elle donne finalement la possibilité de construire (ou déconstruire) dynamiquement une structure acoustique. Nous avons ainsi, au cours de nos travaux, réalisé des modèles présentant des propriétés inaccessibles dans le monde réel : structures qui explosent pour se reformer progressivement, au fur et à mesure de l'amortissement (cf. Annexe 4,

Section 3), structures lestées par des « poids » (modules MAS liés par une liaison Piège) qui s'allègent pour des vibrations de forte amplitude, etc.

Les possibilités au niveau macro-temporel ont peu été explorées à l'heure actuelle, mais elles sont tout aussi prometteuses. La Modification structurelle permet en effet de créer des Générateurs macro-temporels évolutifs, capables de produire des structures musicales dynamiques (changements de tempo, d'intensité, etc.).

8. Métrologie

8.1. Définition

Le terme Métrologie désigne une catégorie de fonctions permettant de mesurer les grandeurs physiques dynamiques dans un modèle (position, vitesse, accélération, force, etc.). Le point commun à tout dispositif de mesure, que ce soit en Physique classique (c'est-à-dire la Physique non-quantique) ou dans GENESIS, est de n'avoir aucune influence sensible sur le phénomène mesuré. La Métrologie fait donc largement appel aux liaisons unidirectionnelles, pour ne pas perturber le comportement de structures observées.

Fondamentalement, toute mesure physique consiste à comparer une grandeur observable avec un étalon servant de référence. On détermine ainsi si la grandeur est plus grande, plus petite, ou sensiblement égale à l'étalon. Si l'on dispose d'un étalon gradué (par exemple, une règle), on obtient une valeur numérique comme résultat de la mesure.[86]

Dans GENESIS, la comparaison entre l'objet mesuré et l'étalon s'effectue grâce aux fonctions « Regarder » ou « Ecouter ». Toute une série de mesures peuvent être réalisées à l'intérieur des modèles, à l'aide des mêmes modules élémentaires qui permettent de construire tous les composants. Comme nous le verrons, le fait que les composants de Métrologie soient intégrés aux modèles les rend utilisables directement pour réaliser des déclenchements. En d'autres termes, une Métrologie basée sur le même formalisme que celui des objets qu'elle vise est un puissant moyen pour réaliser des actions corrélées au comportement des modèles et exercer ainsi un contrôle interne des modèles.

La Métrologie dans la fenêtre « Regarder » est basée sur l'observation du comportement du modèle : on compare alors visuellement la position, la vitesse ou l'accélération des modules simulés. Il s'agit de mesures principalement qualitatives, puisque la fenêtre « Regarder » ne fournit aucune information numérique sur le modèle en cous de simulation.

En utilisant la fonction « Ecouter », on réalise cette fois une mesure quantitative puisqu'on enregistre une suite de valeurs numériques correspondant à l'évolution d'une position ou d'une force au cours de la simulation. Bien que cette fonction soit principalement destinée à l'écoute, l'utilisateur a la possibilité d'enregistrer n'importe quel signal de force ou de position (qu'il soit audible ou non) lui apportant des informations utiles pour le développement de modèles. On pourra ensuite exploiter ces informations dans la fenêtre de visualisation des signaux de GENESIS ou, au besoin, ouvrir le fichier obtenu dans un éditeur plus complet que celle-ci.

La plupart du temps, on réalise les mesures dans la fenêtre « Regarder » ; on n'utilise la fonction « Ecouter » que lorsqu'une mesure numérique précise est nécessaire.

---

[86] La précision de cette valeur est nécessairement limitée ; il s'agit d'une estimation, à laquelle est associée une certaine marge d'erreur. Pour la règle d'écolier, cette marge d'erreur correspond à la division la plus fine, soit en général une longueur d'1 mm : tout ce qu'on peut dire avec certitude, c'est que la longueur mesurée est comprise, par exemple, entre 167 et 168 mm.

8.2. Exemples de mesures dans la fenêtre « Regarder »

8.2.1. Mesurer une position : les « Règles »

La fenêtre « Regarder » de GENESIS ne comporte qu'un seul repère visuel permettant d'estimer l'échelle spatiale des phénomènes qui y prennent place : il s'agit du repère central représentant les trois axes spatiaux (les deux axes correspondant à l'espace de l'Etabli, et l'axe de simulation), matérialisé sous la forme de trois traits partant de l'origine et longs de 1 cm. Ce repère est bien entendu insuffisant, étant donné que les phénomènes simulés peuvent avoir lieu à des échelles complètement différentes (de l'ordre de 10^9 m ou 10^{-9}m, par exemple). La mesure la plus élémentaire est donc celle qui consiste à déterminer la position d'un module <MAT>. Pour cela, on utilise un composant nommé « Règle » qui est tout simplement un ensemble de modules <MAT> immobiles (SOL ou MAS) situés à des positions connues. On obtient une estimation de la position du module concerné en la comparant avec celle des modules de la Règle (Figure 61).

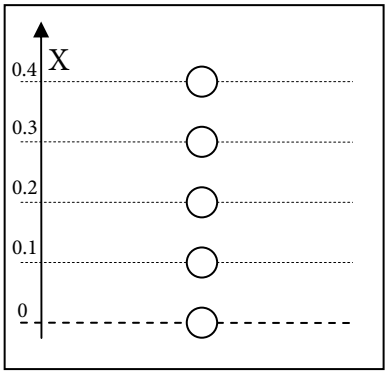


Figure 61 : Une Règle

L'utilisateur est libre de « graduer sa Règle » comme il l'entend. Il peut ainsi créer une Règle « multi-échelles » qui est composée de plusieurs Règles simples correspondant à des ordres de grandeur différents : par exemple, la première Règle est graduée tous les centimètres, la deuxième tout les décimètres, la troisième tous les mètres, et ainsi de suite. Les Règles multi-échelles sont utiles pour déterminer l'ordre de grandeur d'un mouvement dont l'amplitude est *a priori* complètement inconnue.

La technique de mesure de la position que nous venons d'exposer est un exemple de *mesure directe* : l'objet mesuré est en effet directement comparé à l'étalon (la Règle).

8.2.2. Mesurer une vitesse

Pour mesurer la vitesse d'un module dans la fenêtre « Regarder », on peut, dans un premier temps, utiliser une technique similaire à celle de la mesure des positions. La Règle est alors remplacée par un ensemble de modules MAS lancés à des vitesses connues, et on compare visuellement le mouvement du module dont on veut connaître la vitesse avec celui des modules étalons. Il s'agit là aussi d'une *mesure directe*.

Cependant, cette technique est imprécise et elle n'est pas appropriée dans tous les cas. Le problème provient du fait que les modules étalons sont, par définition, en mouvement et tendent donc à sortir de la fenêtre d'observation. Si on veut mesurer une vitesse en tout début de simulation, cela reste praticable, car les modules étalons n'ont pas encore eu le temps de s'éloigner de l'objet à mesurer. Mais dans le cas contraire, cette technique oblige à changer les paramètres de visualisation de façon à voir à la fois le module mesuré et les étalons, ce qui est pour le moins laborieux.

Pour pallier ce problème, on réalise une *mesure indirecte* : on ne va plus comparer deux valeurs de la grandeur qui nous intéresse (ici, deux vitesses), mais deux valeurs d'une autre grandeur physique qui dépend directement de la première. On réalise pour cela une *transduction*, c'est-à-dire une transformation d'une grandeur physique en une autre, la deuxième étant plus aisée à observer que la première. Puisqu'il est facile de comparer des positions dans la fenêtre Regarder, nous allons donc réaliser une transduction vitesse-position. Pour cela, on relie le module dont on veut connaître la vitesse ($\mathcal{M}_1$) à une Cellule TFP ($\mathcal{C}_V$) par une liaison FRO unidirectionnelle. Etant donné que cette interaction exerce par définition une force proportionnelle à la vitesse relative de $\mathcal{M}_1$ et $\mathcal{C}_V$ (V), la position de $\mathcal{C}_V$ sera donc proportionnelle à V, qui peut être assimilée à la vitesse de $\mathcal{M}_1$.[87] On en fait de même pour tous les modules étalons, reliés à autant de Cellules TFP. Pour connaître la vitesse de $\mathcal{M}_1$, il suffira alors de comparer la position de $\mathcal{C}_V$ et celle des Cellules TFP étalons ($\mathcal{C}_{E1}$, $\mathcal{C}_{E2}$, etc.). Pour optimiser le modèle, on peut remplacer les Cellules TFP étalons par une Règle dont les modules MAS sont placés aux positions correspondantes (Figure 62).[88]

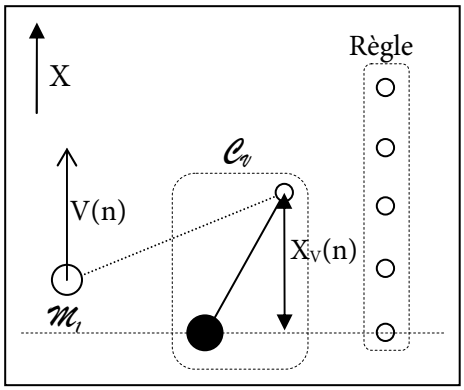


Figure 62 : Mesure indirecte de la vitesse d'un module grâce à une Cellule TFP. La position $X_V(n)$ est proportionnelle à V(n-1)

8.2.3. Mesurer une accélération

Pour mesurer une accélération, on utilise la technique qui vient d'être décrite, mais en ajoutant un niveau de Cellules TFP. En effet, puisque la position de $\mathcal{C}_V$ est proportionnelle à la vitesse de $\mathcal{M}_1$, sa vitesse est proportionnelle l'accélération de $\mathcal{M}_1$. Pour connaître l'accélération de $\mathcal{M}_1$, il suffit donc de mesurer la vitesse de $\mathcal{C}_V$ grâce à une nouvelle Cellule TFP ($\mathcal{C}_A$) reliée à $\mathcal{C}_V$ par un module FRO unidirectionnel (Figure 63).

8.3. Généralisation

Dans les exemples que nous venons d'examiner, on a systématiquement représenté la grandeur à mesurer par la position d'un module MAS faisant partie du composant de Métrologie. La transduction [grandeur à mesurer] → [position d'un module] est en réalité la technique fondamentale de Métrologie dans GENESIS. On peut, dans certaines situations, se contenter d'observer directement des vitesses ou des accélérations. Mais ces cas sont rares, car – nous l'avons vu avec la mesure de la vitesse – le fait que l'étalon soit en mouvement pose des problèmes pratiques d'observabilité. De plus, puisque les mesures sont réalisées par l'observation des modèles en train d'être simulés, il faut prendre en

[87] Cf. Annexe 2, Section 2.

[88] L'étalonnage de la Règle peut se faire par le calcul plutôt qu'expérimentalement, la relation entre la vitesse à mesurer et la position de la Cellule TFP étant simple (cf. Annexe 2, Section 2).

considération le fait que notre perception visuelle est nettement plus performante pour évaluer des positions que des vitesses et, *a fortiori*, des accélérations.

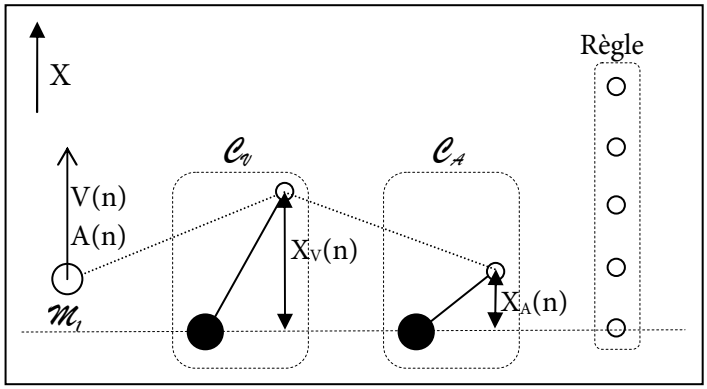


Figure 63 : Mesure de l'accélération d'un module grâce à deux Cellules TFP « en série ». La position $X_A(n)$ est proportionnelle à l'accélération A de $\mathcal{M}_1$ à l'instant n-2, A(n-2).

Ainsi, dans la grande majorité des cas, la « lecture » du résultat d'une mesure se fera par l'observation de la position d'un module MAS, qui sera directement corrélée (et, en général, proportionnelle) à la grandeur que l'on souhaite mesurer. La plupart des composants de Métrologie (à part, évidemment, ceux qui mesurent une position) sont donc constitués d'un transducteur [grandeur à mesurer] → [position] appliqué au module à mesurer ($\mathcal{M}_1$ dans les exemples ci-dessus), et d'un ensemble de modules étalons ayant un comportement parfaitement contrôlé, auxquels sont également appliqués des transducteurs identiques. On notera, comme dans l'exemple de la mesure d'une accélération, qu'un composant de Métrologie peut être constitué de deux sous-composants ou plus : la transduction peut se faire en plusieurs étapes.

Notons que l'étalon est un élément facultatif. Dans certains cas, on souhaitera simplement comparer une même grandeur physique pour plusieurs modules, sans chercher à estimer de valeur précise : c'est ce qu'on appelle une *mesure relative*.

Pour généraliser complètement, il nous faut préciser qu'un composant de Métrologie ne porte pas forcément sur *un seul* module, comme c'est le cas dans tous les exemples que nous avons donnés jusqu'ici : il est tout à fait possible d'effectuer une mesure portant sur plusieurs modules <MAT>. Par exemple, on peut mesurer la *somme* des vitesses d'un ensemble de modules, en connectant chacun d'entre eux à une seule Cellule TFP par un module FRO unidirectionnel. D'autres exemples de mesures multiples sont donnés ci-dessous.

8.4. Exemples de composants de Métrologie

Au cours de la réalisation de l'inventaire GENESIS, nous avons identifiés de nombreux composants de Métrologie différents. Nous en donnons ci-dessous quelques exemples :

- Les Règles (simples ou multi-échelles) que nous avons déjà évoquées.
- La « Jauge de maximum » (respectivement de minimum), dont la position est à tout moment égale à la position la plus haute (resp. la plus basse) occupée au cours de la simulation par le module auquel elle est liée. Ce composant, très général, peut être combiné à n'importe quel autre composant de Métrologie pour marquer la valeur maximale de la grandeur mesurée.

- Le « Barycentre », qui indique à tout moment la position du centre d'inertie d'un ensemble de modules MAS.
- Le « Résonateur», qui est constitué d'un module CEL amorti, accordé à une fréquence spécifique et relié par un module RES unidirectionnel au module mesuré ($\mathcal{M}_1$). Le module CEL, mis en mouvement par l'interaction élastique, « résonne » en réaction au mouvement de $\mathcal{M}_1$; il a une amplitude d'autant plus importante que ce dernier a une composante fréquentielle proche de sa fréquence propre. En utilisant une batterie de Résonateurs accordés à des fréquences différentes et reliés au même module, on peut réalise un analyseur spectral rudimentaire, comparable aux résonateurs de Helmholtz.

Il est évident que ces différents composants ont des utilités diverses. Les deux premiers, ainsi que les composants de mesure de vitesse ou d'accélération, sont principalement utilisés pour la mise au point des modèles. Les deux derniers (avec d'autres, que nous n'avons pas la place de citer ici) ont en premier lieu un intérêt pédagogique, dans la mesure où ils permettent d'illustrer des phénomènes importants liés à l'Acoustique instrumentale ou, plus généralement, à la Mécanique. Ainsi, le Barycentre permet d'observer simplement la conservation de la quantité de mouvement d'un système de modules MAS en interaction. Un ensemble de Résonateurs rends observable, sans avoir à passer par une analyse du signal, différents phénomènes liés aux modes de vibration des structures, comme la disparition plus rapide des composantes à haute fréquence par rapport aux composantes à basse fréquence pour les structures linéaires.

Mais tous les composants de Métrologie peuvent également trouver leur utilité dans la création musicale proprement dite, comme nous allons le voir avec les Détecteurs.

8.5. Les Détecteurs

8.5.1. Définition

Les Détecteurs sont des objets constitués d'un composant de Métrologie lié à un Déclencheur (les deux étant parfois confondus dans le même objet) de telle façon que le Déclencheur entre en action lorsque la grandeur physique mesurée atteint une certaine valeur ou, plus généralement, lorsque les modules observés se trouvent dans un certain « état » (cf. ci-dessous). Une représentation générale d'un Détecteur est donnée dans la Figure 64. Le fait qu'un ensemble de modules atteigne un état donné constitue un *évènement*, dont la détection entraine le déclenchement de n'importe quel processus dans le modèle. On distinguera les processus « informatifs » – qui se contentent de signaler que l'évènement a été détecté[89] – des processus actifs qui interviennent effectivement sur le cours de la simulation (génération de séquences sonores, étouffement d'une structure, etc.).

Un état est une combinaison définie des valeurs d'une ou plusieurs grandeurs physiques, pouvant mettre en jeu des contraintes temporelles. Voici quelques exemples d'états définis par rapport à un seul module <MAT> ($\mathcal{M}$) :

- $\mathcal{M}$ atteint la position X_1.
- $\mathcal{M}$ atteint la vitesse V_1.
- $\mathcal{M}$ atteint la position X_1 avec une vitesse V_1.
- $\mathcal{M}$ a une vitesse uniforme depuis 2 secondes.

[89] Par exemple, la détection d'un évènement particulier peut être signalée par le fait qu'un module, dont c'est le seul rôle, se mette en mouvement à cet instant.

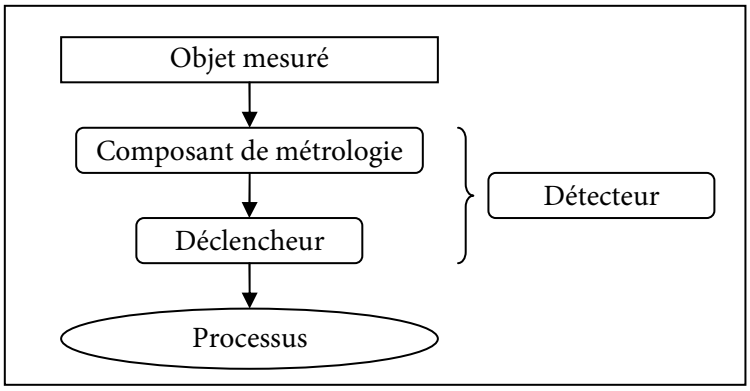


Figure 64 : Représentation générale d'un Détecteur

On imagine bien, à partir de cette liste, que l'ensemble des états possibles relatifs à un seul module est vaste, et à plus forte raison celui des états définis pour un ensemble de modules.

L'utilisation de Détecteurs est un moyen très général pour réaliser un *contrôle interne* dans un modèle, c'est-à-dire pour faire en sorte que le comportement d'un ou plusieurs modules influence de manière décisive le cours de la simulation. Les Détecteurs permettent d'utiliser n'importe quel état pour déclencher n'importe quels processus ou fonctions au sein d'un modèle. Bien sûr, tous les états ne sont pas détectables avec la même facilité ; les composants chargés de détecter un état faisant intervenir la dimension temporelle (comme l'exemple 4 ci-dessus) sont les plus délicats à mettre au point. En réalité, seuls quelques Détecteurs, parmi tous ceux qu'on peut imaginer, ont déjà été développés.

8.5.2. Exemple

Dans le modèle EXEMPLE-7, basé sur le modèle EXEMPLE-1, on utilise un Détecteur pour déclencher l'étouffement d'une structure à viscosité négative lorsque son amplitude de vibration atteint un certain seuil (Figure 65). Le déclenchement est réalisé en trois étapes successives, par autant de sous-déclencheurs en série.

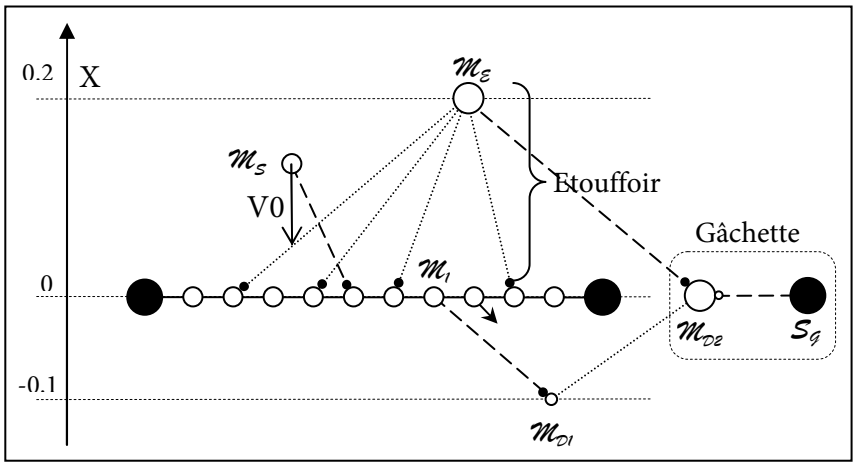


Figure 65 : Le modèle EXEMPLE-7 ; ajout d'un Détecteur couplé à un Etouffoir

Le modèle EXEMPLE-7 est modifié de la façon suivante :

- La viscosité des liaisons REF de la Corde est fixée à Z = -10^{-3}. Après la percussion initiale, l'amplitude de vibration de la structure augmente donc constamment.

- Un Etouffoir est placé à la position initiale X=0,2 : le module MAS ($\mathcal{M}_{\mathcal{E}}$), d'inertie M=$10^8$, est relié à la Corde par quatre modules BUT fortement visqueux. Etant donné sa position initiale, il n'est pas actif au début de la simulation.
- Un Détecteur de position est appliqué à la Corde. Il s'agit d'un module MAS ($\mathcal{M}_{D1}$) de faible inertie (M = 10^{-6}) lié à un module MAS de cette dernière ($\mathcal{M}_1$) par un module BUT élastique très raide. La position initiale du module MAS est X = -0,1 ; elle correspond à la position que l'on veut détecter. Dans ce détecteur de position, le composant de Métrologie et le déclencheur sont confondus : la « mesure » est réalisée par la comparaison de la position de $\mathcal{M}_1$ et celle de $\mathcal{M}_{D1}$. Le déclenchement a lieu lorsque $\mathcal{M}_1$ atteint la position X = -0,1. Il percute alors $\mathcal{M}_{D1}$, ce qui déclenche le mouvement de ce dernier vers le bas. C'est la première étape du déclenchement global (Figure 66).

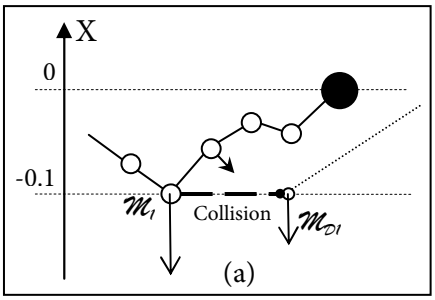


Figure 66 : $\mathcal{M}_1$ percute $\mathcal{M}_{D1}$ et lui communique un mouvement dirigé vers le bas.

- $\mathcal{M}_{D1}$ est relié au module MAS d'une Gâchette ($\mathcal{M}_{D2}$) par un module FRO. Lorsque $\mathcal{M}_{D1}$ est en mouvement, cette interaction provoque un déplacement très faible de $\mathcal{M}_{D2}$ (de l'ordre de 10^{-14} m), ce qui a pour effet de déclencher la Gâchette. $\mathcal{M}_{D2}$ est alors accéléré jusqu'à atteindre une vitesse de l'ordre de 0,1 m.s^{-1} C'est la deuxième étape du déclenchement (Figure 67).

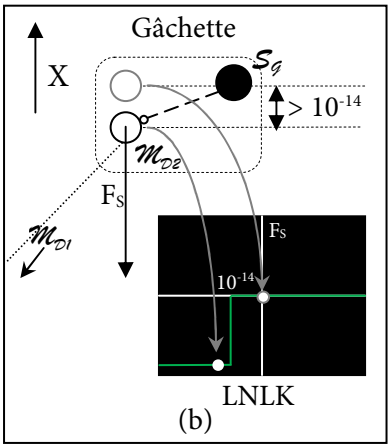


Figure 67 : La friction de $\mathcal{M}_{D1}$ sur $\mathcal{M}_{D2}$ entraîne un mouvement vers le bas de ce dernier, ce qui déclenche la Gâchette (le point de fonctionnement passe dans la portion non nulle de la caractéristique LNLK).

- Enfin, $\mathcal{M}_{D2}$ est relié à $\mathcal{M}_{\mathcal{E}}$ par une liaison BUT très raide, avec un seuil S = -0,3. Lorsque la Gâchette a été activée, $\mathcal{M}_{D2}$ descend et fini par percuter $\mathcal{M}_{\mathcal{E}}$: c'est la troisième étape du déclenchement (Figure 68). Les deux modules ayant la même inertie, c'est une interaction de type « carreau » ($\mathcal{M}_{D2}$ communique l'intégralité de sa vitesse à $\mathcal{M}_{\mathcal{E}}$ et s'arrête). L'Etouffoir se met donc à descendre vers la Corde et amorti progressivement ses vibrations.

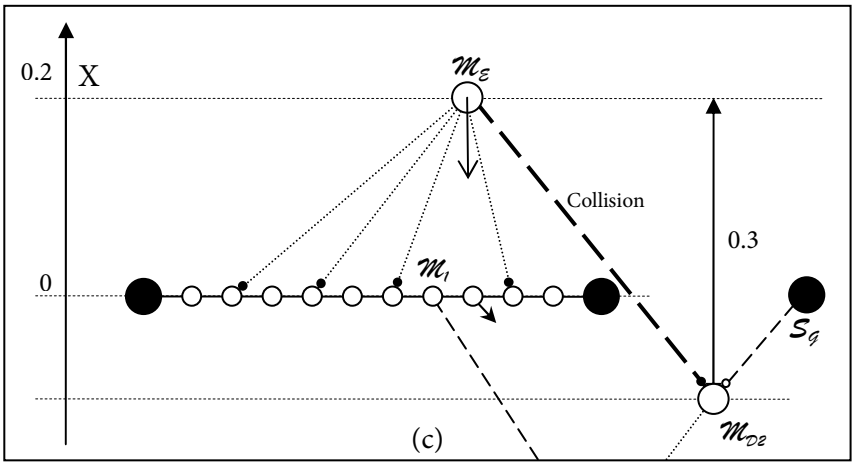


Figure 68 : $\mathcal{M}_{D\mathcal{E}}$ percute $\mathcal{M}_{\mathcal{E}}$, lequel commence à descendre vers la corde pour réaliser l'Amortissement

Ainsi, on a automatisé l'entrée en action de l'Etouffoir, en conditionnant son déclenchement au fait que la Corde atteint une certaine amplitude de vibration.

9. Initialisation

L'Initialisation est la fonction consistant à placer dynamiquement – en cours de simulation – un composant ou un ensemble de composant dans un état propice à son utilisation. En général, les composants d'un modèle sont déjà « prêts à l'emploi » en début de simulation, l'utilisateur ayant pris soin de choisir convenablement les conditions initiales de leurs modules. L'Initialisation est donc le plus souvent synonyme de « réinitialisation » d'un composant ayant déjà servi, en vue d'une utilisation ultérieure. Cependant, l'initialisation d'un composant par ses conditions initiales peut parfois être particulièrement fastidieuse à réaliser. Dans ce cas, il peut être intéressant de passer par une véritable phase d'Initialisation.

Imaginons par exemple que l'on veuille utiliser un Chapelet de modules MAS dont les points d'attache ne sont pas situés à la même position, avec la contrainte que la structure soit à sa position d'équilibre avant l'utilisation. Deux possibilités s'offrent alors :

- On peut fixer « à la main » la position initiale de chaque module MAS du Chapelet, de façon à ce que la structure soit à l'équilibre au début de la simulation. Cette méthode est raisonnable tant que le nombre de MAS n'est pas trop élevé (quelques dizaines au maximum) et que la raideur de la structure est homogène (ce qui simplifie le problème, car les modules MAS sont alors équidistants à l'équilibre). Si l'une de ces deux conditions n'est pas respectée, initialiser le Chapelet de cette manière devient très laborieux.
- L'autre possibilité consiste à laisser le Chapelet atteindre de lui-même sa position d'équilibre durant une phase d'initialisation au début de la simulation. Si le Chapelet est peu amorti, il faudra utiliser un Etouffoir pour raccourcir la durée de cette phase.

Cette deuxième méthode n'est cependant pas sans poser certains problèmes. En effet, on voudrait que la phase d'initialisation soit « transparente », c'est-à-dire qu'elle n'ait aucun impact sur le reste du modèle, puisque la Chapelet n'est pas encore « officiellement » en utilisation. Par exemple, si le Chapelet est une structure acoustique écoutée, il faudrait ne commencer la Captation qu'à la fin de la phase d'initialisation. On voit donc que des composants spécifiques, permettant d'isoler le module concerné tant que l'initialisation n'est pas terminée, sont à mettre à point pour que le passage par une

phase d'initialisation soit toujours réalisable.[90] A l'heure actuelle, les recherches concernant cet aspect n'en sont qu'à leurs débuts.

La question de la réinitialisation de composants est tout aussi épineuse et ouverte. Comment, par exemple, remettre un Domino stationnaire dans sa position initiale après l'avoir arrêté, ou encore « réarmer » une Gâchette déjà utilisée ? Il est fort probable que des solutions existent, mais qu'elles sont relativement complexes. Nous n'avons pas, en tous cas, rencontré de composant réalisant de telles réinitialisations pendant notre parcours du corpus de modèles GENESIS.

La fonction Initialisation est celle ayant le moins été étudiée et mise en oeuvre jusqu'à présent. Elle représente cependant un enjeu important, pour la simple et bonne raison qu'avoir la possibilité de réutiliser un composant évite d'avoir à le dupliquer autant de fois qu'on a besoin de lui dans un modèle. La disponibilité d'un ensemble de composants d'Initialisation généraux et bien maîtrisés pourrait permettre de réaliser des économies substantielles en temps de calcul lors des simulations, pour peu, bien entendu, qu'ils ne soient pas démesurément complexes à utiliser, ni plus lourds à simuler que les composants qu'ils remplacent. En tout état de cause, les recherches portant sur de tels composants apparaissent comme l'une des priorités futures pour le développement de l'Instrumentarium GENESIS.

10. Conclusion

On peut classer les neufs fonctions que nous venons de décrire en trois catégories :

- Les deux fonctions de Génération (acoustique ou macro-temporelle) de mouvements qui sont réalisées par des structures.
- Les fonctions « d'interaction », qui correspondent à des actions modifiant le comportement ou l'état des composants de Génération : l'Excitation, le Déclenchement, l'Amortissement, la Modification et l'Initialisation.
- Les fonctions « d'observation », qui ne perturbent pas, ou seulement de façon négligeable, le comportement des structures auxquelles elles sont appliquées, mais fournissent des informations sur le déroulement de la situation : la Métrologie et la Captation.

Le

[90] Dans l'exemple qui nous intéresse ici, on peut utiliser un composant de Captation à gain variable, qu'on approche du Chevalet une fois la phase d'initialisation terminée. Une autre solution, générale mais non physique, consiste à utiliser la fonction de Séquencement de GENESIS pour ne commencer qu'à la fin de l'Initialisation la simulation des modules <LIA> reliant le composant concerné au reste du modèle, et ainsi l'isoler temporairement.

Tableau 11 résume cette classification des fonctions GENESIS, en donnant pour chacune d'entre elles les différentes sous-catégories que nous avons identifiées dans les chapitres précédents.

Il apparaît clairement, à travers cette classification, que les structures génératrices de mouvements (qu'elles soient acoustiques ou macro-temporelles) sont au cœur de l'organisation des modèles CORDIS-ANIMA (Figure 69). Ce sont elles qui en forment en quelque sorte la « substance », tandis que les structures que l'on trouve dans les composants réalisant les fonctions des deux dernières catégories sont d'une certaine manière des « accessoires », qu'on pourrait comparer, avec toutes les précautions qui s'imposent, à ceux qu'utilise l'instrumentiste : plectre, archet, capodastre, etc. On comprend alors aisément pourquoi la structure vibrante était l'élément central de la hiérarchisation Brutel. Derrière son manque de généralité, cette proposition reflétait déjà d'une certaine manière une vision des modèles musicaux CORDIS-ANIMA en tant qu'ensemble d'objets « solides » en interaction, vision tout à fait naturelle car elle est le miroir de notre expérience quotidienne du monde physique.

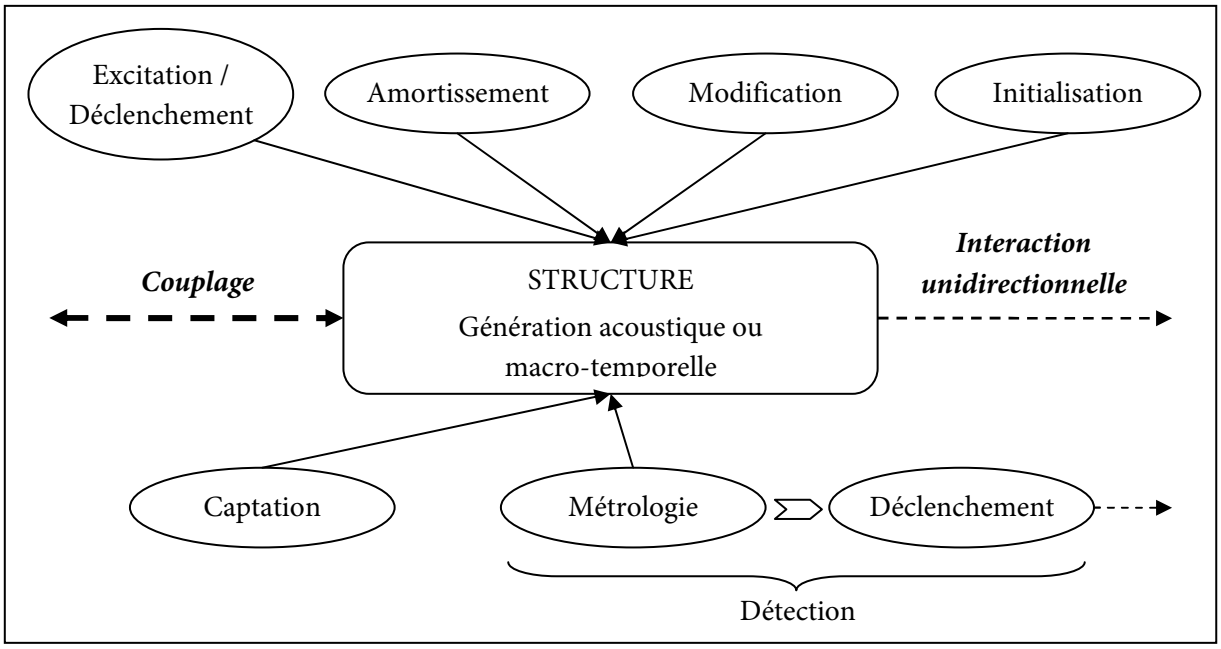


Figure 69 : Organisation des fonctions GENESIS autour d'une structure

Tableau 11 : Récapitulatif des catégories et sous-catégories de fonctions GENESIS

Génération de mouvements	
Génération acoustique	• Primaire • Secondaire
Génération macro-temporelle	• Oscillatoire • Non-oscillatoire
Fonctions d'interaction	
Excitation (externe)	• Macro-temporelle • Acoustique • Artificielle
Déclenchement	• Programmé • Autonome
Amortissement (externe)	• Permanent • Ponctuel (Etouffement)
Modification	• Perturbation élastique • Etirement • Modification structurelle dynamique
Initialisation	• Phase d'initialisation • Réinitialisation
Fonctions d'observation	
Captation	• Directe • Structures mobiles • Captation à gain variable
Métrologie	• Directe • Indirecte (par transduction) • Détection

Chapitre 7. Principes généraux d'organisation des modèles

Ce chapitre réalise la synthèse de certains des aspects les plus importants que nous avons abordés jusqu'à présent, en présentant les trois principes généraux d'organisation des modèles : la composition de fonctions, la structuration des modèles en niveaux hiérarchiques basés sur les échelles de grandeurs physiques, et la génération d'évènements. Ces principes ne sont pas spécifiques à GENESIS : ils sont normalement respectés par tout modèle CORDIS-ANIMA destiné à la production sonore et à la création musicale, car ils émanent du niveau neutre, c'est-à-dire de conditions élémentaires et indépassables propres à la nature du système CORDIS-ANIMA.

1. La composition de fonctions

Au niveau fonctionnel, le principe d'organisation des modèles est celui de la *composition de fonctions*. Les composants d'un modèle sont connectés de sorte que les différentes fonctions qu'ils réalisent s'activent successivement, chacune contribuant à la production du résultat sonore final. On peut représenter de façon générale l'activation des fonctions par un graphe (dit *graphe fonctionnel)*, dont chaque nœud correspond à une fonction associée au composant qui la réalise et chaque arc représente le fait que la fonction de départ est appliquée au composant d'arrivée (Figure 70). L'orientation de l'arc ne représente en aucune manière la nature de l'interaction entre les composants de départ et d'arrivée : il peut aussi bien s'agir d'une interaction unidirectionnelle que bidirectionnelle.

Un graphe fonctionnel comporte des racines (nœuds auquel aucun arc n'aboutit), qui correspondent nécessairement à la fonction d'Excitation ou de Déclenchement, tandis que ses feuilles (nœuds dont aucun arc ne part) correspondent à une fonction d'observation (Captation ou Métrologie).

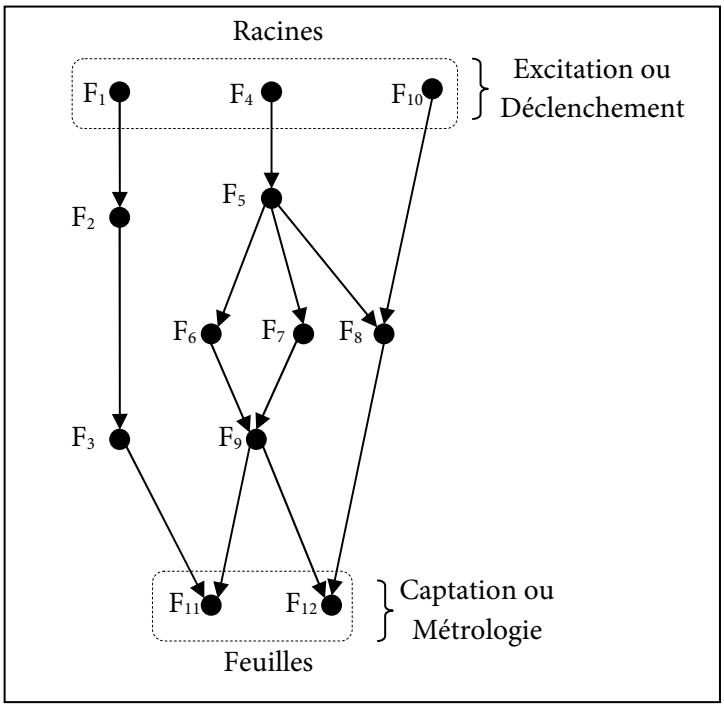


Figure 70 : Exemple de graphe fonctionnel. Les fonctions sont nommées F_i. Les composants associés à chacune ne sont pas nommés.

A l'exception de la Captation, toute fonction est susceptible d'être appliquée à plusieurs composants. Ceci se traduit dans le graphe fonctionnel par des « bifurcations » : plusieurs chemins partent du composant en question, pour éventuellement se rejoindre ultérieurement. Par exemple, dans le graphe de la Figure 70, il y a une bifurcation au niveau de la fonction F_5 et plusieurs jonctions, dont une au niveau de la fonction F_9.

On observe deux schémas de composition des fonctions, qui peuvent cohabiter au sein d'un même modèle :

- Dans la *composition en parallèle*, plusieurs fonctions appliquées à un même composant sont réalisées de façon complètement indépendante du point de vue causal. C'est le cas, par exemple, pour une structure acoustique excitée par un Percuteur élémentaire et modifiée par un Doigt, les deux composants n'ayant aucune interaction entre eux (Figure 71-a). L'Excitation peut avoir lieu avant, pendant ou après la Modification, l'auteur du modèle décidant librement de cette relation temporelle. Ici, les fonctions sont mises en relation selon l'approche de la création musicale par *com-position*.
- Dans la *composition en série*, plusieurs fonctions sont réalisées en s'enchaînant les unes aux autres, l'activation des composants correspondant se faisant par un lien de cause à effet. Par exemple, un Déclencheur excite une structure macro-temporelle, dont le mouvement est utilisé pour réaliser une modification sur une structure acoustique par le biais d'un Doigt (Figure 71-b). Ici, le déclenchement initial est à l'origine de la réalisation de deux fonctions (Génération macro-temporelle et Modification) dépendant les unes des autres : il existe une chaîne déterministe d'activation des fonctions, correspondant à un chemin dans le graphe fonctionnel. La composition en série de fonctions correspond à l'approche de la création par *génération*.

Dans le graphe représenté dans la Figure 70, les fonctions F_1, F_2, F_3 et F_{11} sont composées en série ; F_3 et F_9 sont composées en parallèle, mais pas F_6 et F_7, qui ont un même « antécédent » (F_5) et sont donc liées par une relation de causalité.

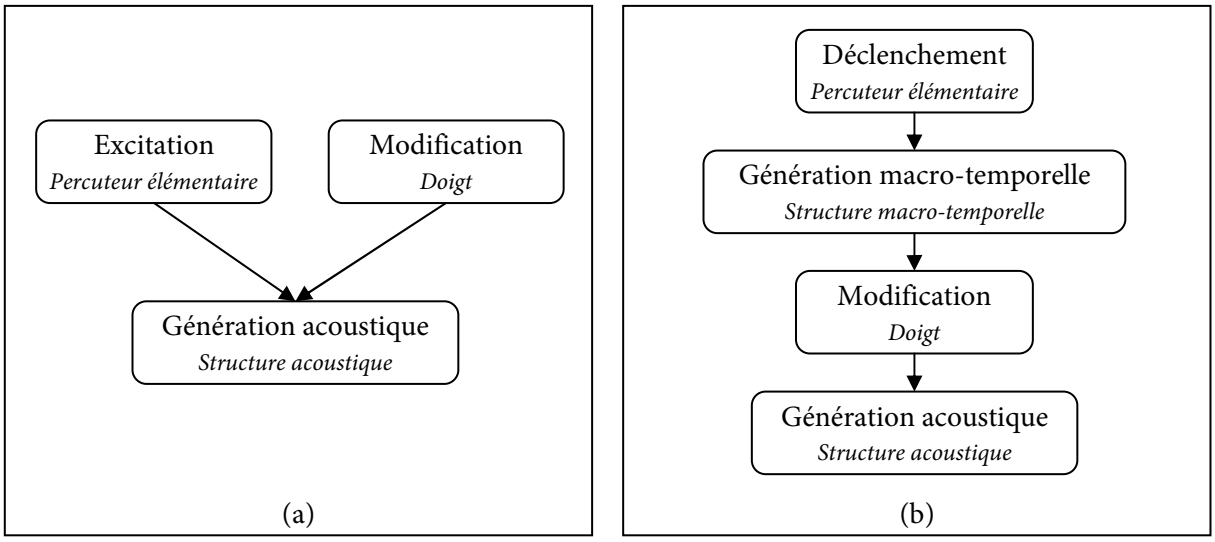


Figure 71 : Exemples simples de composition de fonctions : en parallèle (a) ; en série (b).

Le graphe fonctionnel d'un modèle GENESIS est généralement acyclique – comme c'est le cas dans les trois exemples ci-dessus – sauf lorsqu'un Détecteur est utilisé pour agir sur le modèle (Figure 72).[91]

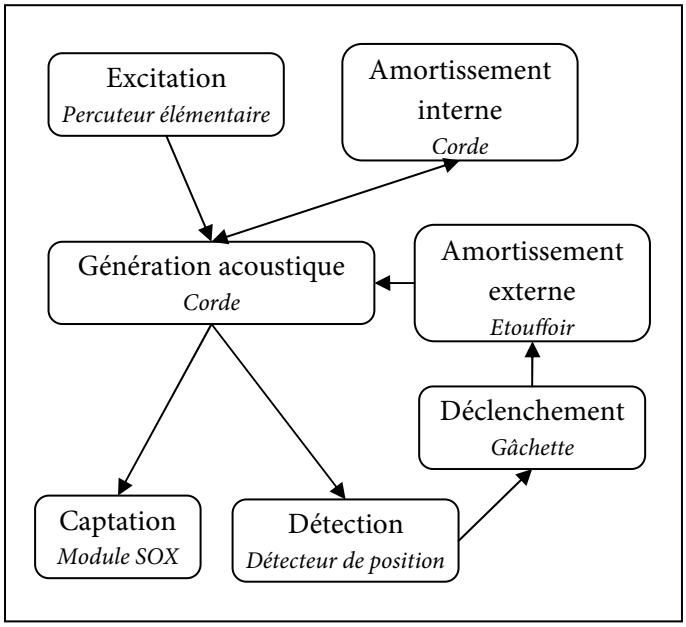


Figure 72 : Graphe fonctionnel du modèle EXEMPLE-7

Notons que le graphe fonctionnel associé à un modèle constitué de plusieurs sous-modèles sera constitué d'autant de composantes connexes, ce qui découle du fait que, par définition, les sous-modèles n'ont aucune interaction entre eux.

Le graphe fonctionnel est l'un des principaux outils permettant de représenter l'organisation des modèles ; nous l'utilisons dans l'Annexe 4 pour réaliser l'analyse de plusieurs modèles complexes. Cependant, il ne représente pas la dimension temporelle des modèles, et ne prend pas en compte les aspects de l'organisation liés aux notions de hiérarchisation, de niveaux et d'échelle sur lesquels nous allons nous attarder maintenant.

2. Niveaux, échelles et hiérarchie dans les modèles

2.1. La hiérarchisation

L'organisation des structures d'un modèle en niveaux hiérarchiques est l'une des techniques les plus générales et fondamentales de la modélisation dans GENESIS. Elle a été observée dans une majorité des modèles du corpus étudié au Chapitre 5.

Le degré de hiérarchisation entre deux structures dépend de la symétrie de leur interaction. La notion de niveau est donc directement liée à la transmission d'énergie entre structures. La hiérarchisation est

[91] Remarquons, dans la Figure 72, que la Corde apparaît deux fois, associée respectivement aux fonctions de Génération acoustique et d'Amortissement interne. Pour être tout à fait précis, on pourrait indiquer que ce sont ses modules REF qui réalisent cet Amortissement, et non la Corde toute entière. Notons par ailleurs qu'on utilise ici une double flèche, car, de façon générale, l'Amortissement *interne* d'une structure ne commence que lorsque celle-ci est en mouvement, c'est-à-dire lorsque la Génération (acoustique ou macro-temporelle) a commencé. C'est donc cette dernière qui initie la réalisation de l'Amortissement interne.

absolue dans le cas d'une interaction unidirectionnelle (cf. p. 144) : la structure qui n'est pas perturbée sera dite de *niveau supérieur* et l'autre de *niveau inférieur*. A l'inverse, il n'y a aucune hiérarchisation entre deux structures fortement couplées : l'interaction a des effets comparables sur l'une et sur l'autre. Entre ces deux situations extrêmes, tous les degrés de hiérarchisation, correspondant à une rétroaction plus ou moins importante de la structure de niveau inférieure sur celle de niveau supérieur, sont réalisables. L'expression « niveau hiérarchique » n'est donc pas systématiquement synonyme d'une situation de hiérarchisation absolue.

La mise en place de plusieurs niveaux au sein d'un modèle répond directement à la problématique de la hiérarchisation de la structure sonore et musicale, dont nous avons souligné l'importance en introduction de cette thèse (cf. p. 49). Le fait que deux structures aient des niveaux différents permet en effet de « découpler » leurs mouvements de sorte que celle de niveau supérieur puisse produire, via son interaction avec celle de niveau inférieur, une séquence d'événements dont la structure est relativement indépendante du comportement de cette dernière.

Pour commencer, on peut ainsi simuler la relation entre un « instrumentiste virtuel » (représenté par un Générateur macro-temporel) et un instrument virtuel (représenté, au minimum, par une structure acoustique), le premier produisant une séquence d'événements sonores à l'aide du second. On reflète ainsi le fait que ces deux éléments sont clairement indépendants dans la situation instrumentale réelle et qu'il existe une hiérarchie entre eux : c'est l'instrumentiste qui *joue* de son instrument et non l'inverse. Il garde à tout moment la maîtrise des phénomènes physique qu'il engendre, pouvant les initier, les amplifier, les atténuer ou les arrêter – sans toutefois les *contrôler totalement*.

La hiérarchisation peut ensuite être appliquée entre Générateurs macro-temporels selon le même principe, ce qui permet à celui de niveau supérieur d'imposer, avec plus ou mois de « force », une structure temporelle sur celle engendrée par celui de niveau inférieur, par le biais de ce que nous avons appelé les fonctions d'interaction. On aborde alors la génération de structures musicales, dont le degré de structuration dépend directement du nombre de niveaux hiérarchiques présents dans le modèle.

2.2. Niveaux hiérarchiques et échelles physiques

2.2.1. L'échelle d'inertie

Comme nous l'avons déjà dit, il existe deux cas où l'interaction entre deux structures est unidirectionnelle. Dans le premier, elles sont situées à des échelles d'inertie très différentes ; l'interaction peut alors avoir une « intensité » importante par rapport à l'échelle de la structure de niveau inférieur. Dans le deuxième, elles sont situées à la même échelle d'inertie, ce qui implique d'une part que l'interaction est extrêmement faible vis-à-vis des deux structures (par exemple, son élasticité est 10^{-9} inférieure à la plus petite inertie des modules <MAT> de celles-ci) et d'autre part qu'une seule des deux structures reçoit de l'énergie (c'est cette structure qui sera dite de niveau supérieur).

La hiérarchisation d'un modèle pourrait être basée entièrement sur ce deuxième schéma, si celui-ci ne posait pas plusieurs problèmes. Le premier est relatif aux échelles d'amplitude. Puisque l'interaction est extrêmement faible par rapport à l'échelle d'inertie des composants, le composant de niveau inférieur va avoir des mouvements d'une amplitude très faible par rapport à l'échelle d'amplitude du composant de niveau supérieur. Par exemple, si on connecte en série trois module CEL avec les paramètres par défaut (M=1, K=0,01 et Z=0,0001) par des modules RES de raideur $K=10^{-9}$, et que l'on donne une amplitude de vibration initiale de 0,01 m au premier CEL, les deux autres, s'ils sont initialement au repos, atteindront des amplitudes maximales de l'ordre de 10^{-7} m et 10^{-11} m respectivement. Le travail sur des modules ayant des échelles d'amplitude aussi différentes est évidemment peu pratique

puisqu'on ne peut pas visualiser correctement les mouvements des composants de chaque niveau en même temps : dans la fenêtre « Regarder », l'utilisateur est obligé de changer le facteur de zoom à chaque fois qu'il veut passer d'un niveau à un autre. De plus, si un modèle utilise de nombreux niveaux, on risque atteindre les limites de précision numérique des algorithmes de simulation à force de travailler sur des mouvements de plus en plus petits.

L'autre problème posé par ce schéma d'organisation hiérarchique est d'ordre conceptuel et cognitif. Bien que GENESIS n'ait pas pour vocation de servir à la reproduction précise d'objets ou de phénomènes réels, l'utilisateur s'appuie nécessairement sur son expérience du monde physique lors du développement d'un modèle. Les objets manipulés dans GENESIS ont des propriétés communes avec les objets réels : position, amplitude de mouvement, vitesse, inertie, etc. Il est donc tout fait naturel de s'inspirer des échelles de grandeurs physiques expérimentées au quotidien pour fixer les échelles de grandeur présentes dans un modèle. Il s'agit d'une expression du fameux principe d'économie cognitive : se confronter à des échelles sortant complètement du champ de notre expérience quotidienne constitue une charge cognitive superflue. GENESIS offre par exemple la possibilité de modéliser des « instruments » oscillant à l'échelle spatiale du système solaire ou, au contraire, de la plus petite particule physique, mais il est bien plus simple de s'en tenir à des échelles spatiales que nous pouvons appréhender facilement, dont nous avons une bonne représentation mentale (soit environ entre le kilomètre et le millimètre).

En raison de ces deux problèmes, le schéma de hiérarchisation basé sur des composants de même échelle d'inertie est peu utilisé.[92] Par ailleurs, en faisant abstraction de l'échelle spatiale, l'utilisation de composants situés à des échelles d'inertie différentes répond de toute façon à la problématique de modélisation que nous venons de soulever. Le monde physique est composé d'objets situés à différentes échelles d'inertie, y compris dans la situation instrumentale qui sert presque toujours, plus ou moins consciemment, de référence à un moment ou à un autre du processus de modélisation. Il est naturel que les modèles GENESIS reflètent cet état de fait : procéder autrement serait là encore en contradiction avec nos représentations mentales habituelles.

Ainsi, dans la quasi-totalité des cas, la notion de niveau hiérarchique dans GENESIS est basée sur une différenciation des échelles d'inertie. L'usage le plus courant est que les structures acoustiques primaires sont composées de modules MAS ou CEL dont l'inertie est de l'ordre de 1 (qui correspond à la valeur par défaut du paramètres M lorsque ces modules sont crées). Les composants de niveau supérieur auront une inertie d'autant plus élevée qu'on souhaite que la hiérarchisation soit forte. Un rapport de l'ordre de 10^9 entre l'inertie du niveau supérieur et celle du niveau inférieur entraîne quasi-systématiquement l'établissement une hiérarchisation absolue.

2.2.2. L'échelle d'amplitude

L'observation du corpus de modèles GENESIS révèle deux « règles » dans le rapport entre les niveaux hiérarchiques et les échelles d'amplitude. Elles n'ont rien d'obligatoire, mais découlent de contraintes pratiques élémentaires.

Premièrement, on remarque généralement que les composants de niveau supérieur ont des mouvements de plus grande amplitude que ceux de niveau inférieur. Pour comprendre cette organisation, il faut en premier lieu considérer le fait que la plupart des fonctions d'interaction sont

[92] On l'observe le plus souvent dans la relation entre une structure acoustique primaire et une structure acoustique secondaire. En effet, cette dernière a pu d'abord être développée en tant que structure primaire, puis être utilisée comme structure secondaire sans qu'on modifie son échelle d'inertie (ce qui peut être fastidieux à réaliser pour les structures non linéaires)

réalisées lorsque deux composants se trouvent à proximité l'un de l'autre. Par exemple, un Doigt, qui est, en raison de son inertie très élevée, un composant de niveau supérieur au composant sur lequel il agit, « appuie » sur une structure lorsque son module MAS est à la même position que celle-ci. Lorsqu'on utilise un Doigt mobile et qu'on veut, à un moment donné, que celui-ci cesse de perturber la structure, il faut le déplacer suffisamment loin de cette dernière pour que toute interaction devienne impossible. Le mouvement correspondant au retrait du Doigt doit donc avoir une amplitude nettement supérieure à l'amplitude maximale de vibration de la structure. De façon générale, on peut dire que lorsqu'on veut qu'une fonction d'interaction soit réalisée ponctuellement, il faut que le composant responsable de cette fonction puisse s'éloigner suffisamment du composant cible pour que l'interaction s'interrompe.[93] Dans la situation instrumentale réelle, on retrouve ce découplage entre l'échelle spatiale des différents éléments de la chaîne instrumentale. Par exemple, le mouvement d'un plectre a forcément une amplitude supérieure à la vibration de la corde qu'il excite, sinon il resterait au contact de celle-ci et gênerait son mouvement.

Par ailleurs, la différenciation des échelles d'amplitude entre niveaux hiérarchiques est également liée à la transmission d'énergie dans le cas de l'Excitation et du Déclenchement. De façon informelle, on peut dire qu'il faut de la place pour prendre de la vitesse et la transmettre. Revenons au modèle EXEMPLE-3 pour illustrer ce point (p. 193). Rappelons que dans ce modèle, un Générateur macro-temporel (une Cellule) est utilisé pour percuter une Corde à une fréquence de 1 Hz. Imaginons que l'on veuille, tout en conservant la fréquence des percussions, augmenter la violence de l'impact – par exemple pour que le son produit par la Corde soit plus fort par rapport à un autre son. Il faut pour cela que la vitesse avec laquelle le module MAS de la Cellule arrive au niveau de la Corde soit plus importante, ce qu'on obtient en accroissant l'amplitude d'oscillation de la Cellule. En effet, son module MAS parcourra ainsi dans le même temps (une seconde) une distance supérieure : sa vitesse moyenne sera donc augmentée. Ce raisonnement extrêmement simple est tout à fait général. Plus on veut qu'un composant ait une énergie cinétique élevée, plus il doit aller vite : à fréquence constante, il faut donc augmenter l'amplitude de ses mouvements.

La deuxième « règle » concernant le rapport entre les niveaux hiérarchiques et les échelles d'amplitude est relative aux structures acoustiques : on observe effectivement que les différentes structures acoustiques d'un modèle ont souvent des échelles d'amplitude similaires. Cette tendance est moins marquée que la précédente ; il s'agit plus d'une règle de « bon usage » de GENESIS que d'une contrainte incontournable. Cette organisation permet d'écouter toutes les structures acoustiques avec des composants de Captation ayant approximativement les mêmes paramètres. En outre, elle simplifie la représentation mentale du modèle par l'utilisateur. Lorsqu'on utilise uniquement des modules SOX pour capter des vibrations acoustiques, elle s'impose d'elle-même : si les amplitudes d'oscillations des structures acoustiques étaient trop différentes, certaines d'entre elles seraient tout simplement inaudibles dans le son produit par la simulation.

Le respect de cette deuxième règle impose une certaine rigueur dans le travail sur des projets conséquents avec GENESIS. En particulier, si on souhaite réaliser un modèle complexe en assemblant plusieurs modèles élaborés séparément, il est important de se fixer une certaine échelle d'amplitude pour toutes les structures acoustiques de chacun d'entre eux afin que leur composition se fasse de façon aisée, sans qu'on ait besoin de modifier de façon trop importante les amplitudes d'oscillation au moment de l'intégration.

---

[93] Plus précisément, ce raisonnement est valable pour des interactions élastiques discontinues, comme le module BUT ou l'interaction de type Plectre. Les interactions visqueuses, quant à elles, ne dépendent pas des positions respectives des modules <MAT>, mais de leur vitesse relative.

2.2.3. *L'échelle fréquentielle*

Le rapport entre le niveau d'une structure et son échelle fréquentielle n'est pas aussi contraint que pour les échelles d'inertie et d'amplitude. On observe souvent que lorsque deux structures sont en interaction, celle de niveau supérieur a une échelle fréquentielle plus basse que celle de niveau supérieur. C'est typiquement le cas dans la relation entre un Générateur macro-temporel et une structure acoustique. De façon générale, cet aspect de l'organisation des modèles découle de la hiérarchisation au niveau structurel : la structure d'une pièce musicale est souvent conçue comme un assemblage de différentes parties, elles-mêmes constituées de sous-parties plus courtes, et ainsi de suite, jusqu'à arriver au niveau des phrases, puis des notes.

Toutefois, il n'y dans cet aspect organisationnel aucune contrainte pratique – on peut d'ailleurs dire qu'il relève du niveau poiétique et non du niveau neutre, contrairement aux principes que nous avons abordés précédemment. Par exemple, il est tout à fait envisageable qu'une structure acoustique interagisse avec une structure macro-temporelle de niveau inférieur, une situation qui peut éventuellement être pertinente pour la composition sonore.

3. La génération d'évènements

Dans un modèle CORDIS-ANIMA, la génération d'évènements sonores et musicaux est en quelque sorte la « fonction ultime », dans le sens où elle est nécessaire, au moins au niveau sonore, à la réalisation d'un modèle *musical*.

Dans le domaine musical, le terme *évènement* évoque en premier lieu la notion de *note*, qui est l'entité élémentaire de la structure musicale écrite de façon traditionnelle. La production d'une note dans un modèle physique CORDIS-ANIMA est le plus souvent réalisée par l'Excitation d'une structure acoustique. Mais on peut également parler d'évènement pour un ensemble de phénomènes beaucoup plus large. Par exemple, le début d'un *accelerando*, ou le passage entre deux parties successives d'une pièce peuvent être vus comme des évènements, car ils constituent des discontinuités remarquables, sensibles, dans « le cours des choses ».

Il en est de même dans CORDIS-ANIMA, où l'Excitation d'une structure acoustique est loin d'être le seul phénomène générateur d'évènements. Dans ce contexte, on peut définir un évènement comme *une singularité dans l'évolution temporelle d'une ou plusieurs grandeurs physiques*. Il est alors évident que toutes les fonctions que nous avons définies précédemment (à l'exception de la Captation et de la Métrologie directe) produisent un ou plusieurs événements lorsqu'elles sont réalisées, puisqu'elles agissent toutes physiquement sur un ou plusieurs composants.

Chaque évènement produit dans un modèle CORDIS-ANIMA doit en principe avoir une répercussion sur la production sonore du modèle – faute de quoi il est inutile, à moins, qu'il s'agisse d'un modèle d'étude. Cependant, cela ne signifie pas que tous les évènements soient *sonores* : ceux qui touchent à des structures situées à un niveau macro-temporel n'influent qu'indirectement sur la production sonore. Par exemple, si un Etouffement est appliqué à un ZIG macro-temporel, lui-même utilisé pour exciter une structure acoustique, l'entrée en application de cette fonction n'entraîne pas immédiatement de phénomène audible : elle va simplement provoquer le ralentissement progressif du ZIG et, par conséquent, celui de la séquence de notes qu'il engendre.

En ce qui concerne les évènements sonores, il est possible de les catégoriser partir des quatre paramètres des sons (hauteur, timbre, amplitude et durée), en dehors de toute référence à CORDIS-ANIMA. On distinguera donc les types d'évènements suivants :

- l'attaque ;

- l'extinction ;
- la modification de la hauteur ;
- la modification du timbre ;
- la modification de l'amplitude.

On remarque immédiatement que chacun des ces évènements peut être provoqué, dans CORDIS-ANIMA, par les fonctions élémentaires que nous avons identifiées :

- L'attaque est produite par l'Excitation.
- L'extinction du son est engendrée soit par un Amortissement permanent (interne ou externe), soit par un Etouffement.
- Les modifications de hauteur et de timbre sont réalisables soit par Modification (par exemple, l'étirement d'une structure acoustique en X^3), soit par Excitation continue.
- La modification de l'amplitude, enfin, peut être réalisée par Etouffement ou au contraire par une Excitation, par exemple à l'aide d'un « Amplificateur » (cf. p. 187).

Sans affirmer, bien entendu, que CORDIS-ANIMA permet de réaliser n'importe quel évènement sonore, les correspondances que nous venons d'établir démontrent la complétude conceptuelle de notre base de fonctions élémentaires au niveau acoustique.

Par ailleurs, au niveau macro-temporel, l'utilisation de Détecteurs permet en principe de réaliser une grande diversité de processus dont « l'exécution » est conditionnée par l'état physique du modèle. Il est possible ainsi d'aborder une logique compositionnelle faisant appel à une forme de traitement de l'information, réalisée uniquement à l'aide de modules physiques. Pour l'instant, nous disposons uniquement d'exemples aussi simples que celui du modèle EXEMPLE-7 ; il reste à mener des expérimentations poussées pour évaluer la faisabilité pratique et la pertinence pour la création musicale avec le modèle physique de ce type d'approche.

4. Conclusion

Il n'est pas possible d'en dire plus sur l'organisation des modèles musicaux CORDIS-ANIMA sans entrer dans le détail des nombreuses techniques de modélisation actuellement connues – qu'elles soient propres ou générales, au sens où nous avons défini ces termes dans le Chapitre 5 – mais une telle présentation n'entre pas dans nos objectifs. Les principes que nous avons exposés ici appartiennent pour la plupart au niveau neutre de l'analyse de la modélisation, auquel l'Instrumentarium en tant que système conceptuel doit se cantonner comme nous l'avons déjà mentionné. Avec la liste des différentes fonctions, ils forment la base d'une pédagogie de la création musicale à l'aide de CORDIS-ANIMA, même si une représentation comme le graphe fonctionnel demandera sans doute à être adaptée pour la rendre accessible au plus grand nombre d'utilisateurs.

Ces principes ont bien entendu des implications concrètes au niveau de la pratique de la modélisation. En particulier, les considérations que nous avons formulées par rapport aux échelles d'amplitudes aboutissent à l'idée de réaliser, au moins à ce niveau, une *normalisation* des modèles dont l'objectif est de rendre plus facile leur composition pour la construction de modèles très complexes. En effet, lorsqu'il s'agit de manipuler au sein d'un même fichier plusieurs dizaines de sous-modèles, représentant des milliers ou des dizaines de milliers de modules élémentaires, il est évident qu'une certaine rigueur est nécessaire dans le processus de modélisation si l'on souhaite éviter une fastidieuse

phase de « calibrage » (c'est-à-dire de modification des échelles physiques propres à chaque sous-modèle) au moment de leur intégration. Cette normalisation n'a pas un caractère obligatoire pour les utilisateurs de GENESIS, mais elle sera systématiquement utilisée dans la librairie de modèles fournis avec l'environnement. Les deux « normes » actuellement définies concernent uniquement les structures acoustiques :

- l'inertie des modules MAS et CEL doit être de l'ordre de 1.
- l'amplitude des oscillations de la structure doit être de l'ordre de 1 cm.

En pratique, la normalisation des modèles existant n'est pas un problème trivial lorsque des structures ou des phénomènes fortement non linéaires (comme l'excitation par un Archet) sont en jeu. Une étude devra sans doute être consacrée spécifiquement à cette question afin d'une part de réaliser avec efficacité la normalisation des modèles destinés à constituer la librairie distribuée avec GENESIS, et d'autre part de proposer aux utilisateurs un certain nombre de règles pratiques leur permettant, s'ils le désirent, de la pratiquer dans leurs propres modèles.

Conclusion et perspectives

Les travaux présentés dans cette thèse forment la base conceptuelle de l'Instrumentarium pour la création musicale avec le système CORDIS-ANIMA, qui est lui-même appelé à être au cœur de l'environnement didactique de GENESIS. L'organisation générale des modèles que nous proposons a été élaborée selon une démarche partant de la définition précise des aspects les plus élémentaires des modèles (les différents types d'interactions et de constituants, les échelles de grandeurs physiques, les conditions nécessaires et suffisantes pour qu'un modèle produise un son, etc.) et d'une observation minutieuse d'un large corpus de modèles, afin de faire émerger progressivement les aspects de plus haut niveau. Nous avons ainsi, dans un premier temps, identifié et relié entre elles les trois catégories conceptuelles principales de cette organisation (les fonctions, les composants et les techniques de modélisation), qui peuvent désormais servir de base à une pédagogie de la création musicale avec CORDIS-ANIMA. Dans un deuxième temps, nous avons proposé une liste de 9 fonctions élémentaires, accompagnées d'exemples de composants et de techniques de modélisation permettant de les réaliser, qui constituent une base suffisante pour prendre en compte l'ensemble des modèles GENESIS réalisés à ce jour. Enfin, à partir de ces résultats, nous avons étudié les principes généraux d'organisation des modèles : la composition de fonctions, la structuration en niveaux hiérarchiques basés sur les échelles physiques et la génération d'évènements sonores et musicaux.

Le choix d'une démarche d'élaboration progressive de connaissances à partir de considérations élémentaires a été dicté par notre volonté de ne pas projeter sur l'Instrumentarium une vision subjective. Dans cet objectif, une approche résolument « minimaliste » de notre problématique s'est avérée nécessaire. Nous sommes ainsi volontairement restés au plus près du niveau neutre de l'analyse de la modélisation, n'évoquant le niveau poiétique qu'aux travers des techniques de modélisation évoquées en illustration, afin que l'organisation proposée n'oriente en rien l'utilisateur dans sa démarche de création musicale avec le système CORDIS-ANIMA. Les neuf fonctions élémentaires et les principes généraux d'organisation des modèles que nous avons identifiés et décrits se situent exclusivement au niveau physique : ils forment un « langage objectif » qui émerge directement des règles élémentaires du système CORDIS-ANIMA. C'est moins à l'Instrumentarium qu'aux autres parties de l'environnement didactique de GENESIS que reviendra le rôle d'aborder les niveaux poiétique et esthésique, par exemple au travers de descriptions détaillées de techniques de modélisation générales ou de présentations de modèles auteur.

Au cours de la réalisation de l'environnement didactique, une attention spécifique devra être accordée à la description des différentes approches de la modélisation, que nous n'avons pu qu'effleurer dans le premier chapitre ce document tant il s'agit d'un sujet vaste. La participation à de nombreux ateliers de création avec GENESIS nous a en effet permis d'observer certaines incompréhensions récurrentes de ces aspects chez les utilisateurs débutants – avec, notamment, une forte tendance à vouloir pratiquer la modélisation structurelle pour des objets qui ne s'y prêtent pas. Elles peuvent être dissipées facilement en présence d'un formateur expérimenté. Mais pour un utilisateur découvrant GENESIS par lui-même, elles risqueraient de persister et de provoquer des déceptions conduisant à la sous-exploitation des possibilités de l'environnement, voire à son abandon. Il est donc capital d'anticiper ces difficultés.

L'organisation générale des modèles GENESIS que nous proposons a démontré sa pertinence en permettant l'analyse complète de modèles « exotiques », très éloignés de ceux, basés sur la chaîne instrumentale traditionnelle, qui étaient pris en considération par les précédentes approches

systémiques. L'abandon de la structure vibrante comme élément central des modèles et la focalisation sur la notion de *fonction* en lieu et place de celle de *composant* a permis d'une part de lever les ambiguïtés qui portaient sur l'analyse d'une partie des modèles et d'autre part de prendre en considération un nombre beaucoup plus important de modèles, sans limite sur le nombre de niveaux hiérarchiques. D'une certaine manière, l'organisation que nous proposons est modulaire, tout comme le système de modélisation lui-même. En effet, à l'exception de la Génération acoustique et de la Génération macro-temporelle, les fonctions que nous avons définies ne se situent pas à un niveau spécifique dans les modèles ; c'est ce que montre la Figure 69, au centre de laquelle apparait une structure dont on ne précise ni le niveau auquel elle appartient (acoustique ou macro-temporel), ni les processus auxquels elle participe.

Le système conceptuel que nous proposons ne sera totalement validé que lorsqu'il aura été mis en pratique pour la pédagogie et la création : nous n'avons pour l'instant utilisé ce système que pour *analyser* des modèles, il reste à vérifier s'il est également pertinent pour *apprendre à les créer*. Pour cela, il faut bien sûr réaliser l'Instrumentarium sous son aspect concret. Bien que cette tâche n'ait pas été au cœur de nos travaux, nous avons commencé à explorer plusieurs pistes, notamment au travers de la définition d'un format de fiches pédagogiques destinées à décrire de manière précise (y compris à l'aide de formules et de résultats analytiques) les modules élémentaires et les composants GENESIS. Plusieurs de ces fiches, dont l'ensemble de celles concernant les 10 modules élémentaires, ont par ailleurs été réalisées. Mais il ne s'agit là que de la toute première pierre de l'édifice. Nous avons déjà évoqué dans ce document de nombreux composants ou techniques de modélisation, qui ne représentent qu'une partie de tous ceux que nous avons identifiés en réalisant l'inventaire. Ainsi, même s'il ne s'agit pas de tous les documenter – répétons encore que l'exhaustivité est une utopie dans un environnement modulaire – la réalisation de l'Instrumentarium sera une tâche longue, d'autant qu'il ne suffira pas simplement de décrire qualitativement les différents composants ou techniques, mais également de les caractériser aussi précisément que possible de façon analytique, afin que leur mise en œuvre puisse se faire très directement. Dans cette perspective, il sera sans doute fort utile de faire appel à des outils d'analyse des modèles n'ayant pas encore été utilisés jusqu'à présent, en particulier ceux décrits par Alexandros Kontogeorgakopoulos dans ses travaux récents [Kontogeorgakopoulos 2008].

***

Dans l'environnement didactique, l'Instrumentarium présentera un double aspect : il comportera d'une part une description du système conceptuel que nous avons élaboré, comprenant en particulier la liste des fonctions élémentaires, et d'autre part un ensemble de fiches pédagogiques situées à un niveau concret, décrivant des objets CORDIS-ANIMA ou des techniques de modélisation propres et « pointant » vers les aspects conceptuels. Grâce à la navigation hypertexte, l'ensemble de ces éléments combinés formera un réseau de connaissances que l'utilisateur pourra parcourir librement, selon ses besoins et à partir de différents points d'accès. La forme même de l'Instrumentarium, aussi éloignée que possible d'une présentation hiérarchique « dirigiste » telle que celle du Manuel Brutel, sera propice à la découverte progressive des possibilités de GENESIS.

En ce qui concerne la librairie de modèles incluse dans l'Instrumentarium, tout ou presque est encore à faire ; mais nous pouvons déjà proposer quelques pistes générales pour sa réalisation. Tout d'abord, il serait sans doute tout à fait pertinent de nous inspirer du cas de Pure Data, dont la librairie de patches fait également partie de la documentation de l'environnement : la plupart de ces *patches* sont abondamment commentés et forment un parcours d'apprentissage autonome, dont le seul prérequis est la lecture du Manuel. Il est possible d'en faire autant avec GENESIS grâce à l'outil permettant

d'insérer des commentaires textuels dans les modèles – voire plus, étant donné que cet outil prendra en charge le langage HTML, ce qui permettra d'y ajouter des images et des liens hypertexte. Le regroupement dans un même fichier d'un ou plusieurs modèles et d'un texte explicatif est d'une grande efficacité pour l'apprentissage, car il établit un lien étroit entre l'introduction de nouveaux concepts et leur expérimentation concrète, le passage de l'un à l'autre ne nécessitant pas de changement d'environnement. Quant à la structuration de la librairie des modèles proprement dite, elle s'appuiera en partie sur nos travaux, et en particulier sur les différentes classifications (interactions, structures, fonctions) que nous avons établies. Comme nous l'avons déjà souligné, nous pensons qu'il serait utile de proposer d'accéder à cette librairie à travers une interface spécifique, qui permettrait d'effectuer des recherches parmi les critères de classification utilisés : par exemple, l'utilisateur pourrait demander à consulter la liste des modèles contenant une structure maracassée. En outre, il serait aussi envisageable, de façon symétrique, de donner à l'utilisateur la possibilité d'attribuer à ses propres modèles, au moment de leur enregistrement, des valeurs pour tout ou partie des critères définis, afin de les retrouver plus facilement ultérieurement.

L'organisation générale de l'environnement didactique lui-même n'est pas encore définie avec précision et il est probable que, dans un premier temps, il se limitera à l'Instrumentarium. A un niveau pratique, un outil d'édition structurée, permettant de réaliser le contenu de l'environnement didactique est en cours d'évaluation : il produit des documents au format XML qui peuvent ensuite être interprétés et affichés dans un navigateur Internet.

Comme nous l'avons montré dans le Chapitre 1, l'approche de la création musicale par modélisation physique se distingue de l'approche signal par l'absence d'une « culture » bien établie au sein d'une large communauté d'utilisateurs, ce qui constitue un frein potentiel à la diffusion à large échelle de GENESIS. Pour de nombreux environnements modulaires de création, comme Csound et Pure Data, il existe des sites Web permettant aux utilisateurs de communiquer par le biais de forums ou d'échanger des *patches*. Etant donné la singularité de GENESIS dans le paysage de l'informatique musicale, il nous paraît évident que de tels moyens de communication doivent absolument être mis en place afin de favoriser l'émergence d'une communauté dynamique d'utilisateurs, à même de s'entraider, de faire évoluer l'Instrumentarium et de l'enrichir. L'environnement didactique de GENESIS devrait ainsi, d'une façon ou d'une autre, être ouvert sur Internet afin qu'une « culture de la modélisation physique » puisse elle aussi voir le jour. Site web classique, forums, *wikis* : les possibilités sont nombreuses et ne demandent qu'à être explorées.

***

Nos travaux ne concernent pas seulement GENESIS mais, plus largement, la création musicale avec le système CORDIS-ANIMA. Dans ce contexte élargi, le système conceptuel que nous avons proposé conserve toute sa pertinence : les fonctions élémentaires, les catégories conceptuelles et les principes généraux d'organisation des modèles sont applicables à toute mise en œuvre sonore et musicale de CORDIS-ANIMA, qu'elle diffère de GENESIS par le nombre de dimensions de l'espace de simulation ou par la simulation en temps réel. En réalité, seule une partie des composants et des techniques de modélisation que nous avons présentés peuvent perdre leur pertinence selon le nombre de dimensions. Par exemple, dans un espace 2D, il est possible de modéliser un plectre de façon structurelle et non fonctionnelle comme on le fait en 1D : le Plectre GENESIS peut alors être remplacé par un composant qui modélise mieux le mécanisme réel du pincement, mais c'est toujours la fonction Excitation qu'il réalise. En ce qui concerne la simulation en temps réel à retour d'effort, elle n'impose aucun changement à notre système conceptuel. Dans cette situation, un ou plusieurs modules <MAT> du modèle sont manipulés par l'utilisateur, via une interface haptique telle que les Transducteurs Gestuels

Rétroactifs développées par le groupe ACROE – Laboratoire ICA. Ces modules sont tout simplement considérés comme des composants de Génération macro-temporelle (il ne peut pas s'agir de Génération acoustique puisque le geste humain est incapable d'atteindre des fréquences d'oscillation aussi élevée), dont les relations avec les autres composants du modèle sont exactement les mêmes que s'il s'agissait d'une structure macro-temporelle « normale ».

Il nous faut d'ailleurs rappeler que CORDIS-ANIMA a été conçu en premier lieu pour la simulation multisensorielle interactive. GENESIS n'est donc pas l'unique aboutissement de ce système dans ses applications pour la création musicale. La simulation en temps différé permet de modéliser des composants produisant des « gestes virtuels » (au sens de *mouvements macro-temporels*), mais n'offre pas à l'utilisateur la possibilité d'interagir avec ses modèles par des gestes réels. On peut bien sûr considérer GENESIS en soi comme un environnement de création autonome et opérationnel. Mais il est également important de souligner que tous les modèles développés jusqu'à aujourd'hui à l'aide de cet environnement peuvent en principe être simulés en temps réel, la seule limitation en la matière résidant dans la capacité de calcul disponible, qui restreint le nombre de modules utilisables. Avec la montée en puissance constante des ordinateurs, nous sommes assurés qu'il sera un jour possible de réaliser la simulation multisensorielle interactive de modèles composés de plusieurs milliers de modules élémentaires. Dès lors, GENESIS peut aussi être vu comme un modeleur en temps différé permettant de créer et de préparer des modèles destinés à la simulation multisensorielle interactive. Il sera possible de puiser directement dans l'Instrumentarium, aussi bien au niveau conceptuel qu'au niveau pratique, afin de réaliser des modèles temps réel avec lesquels l'utilisateur pourra interagir à l'aide de gestes, dits « instrumentaux » s'ils s'appliquent au niveau acoustique ou « supra-instrumentaux » s'ils s'appliquent au niveau macro-temporel, agissant par exemple sur des structures dont les échelles physiques – particulièrement au niveau de l'inertie – sont totalement hors de notre portée dans le monde réel [Cadoz 2007].

***

Depuis plus de dix ans, GENESIS a été utilisé pour la création de nombreuses pièces musicales, dont les plus récentes ont été présentées lors d'*ENACTIVE/07 .... Enaction_in_Arts*, évènement artistique et scientifique international organisé à Grenoble en novembre 2007. Les approches adoptées varient de la « simple » production de sons isolés (destinés à être composés avec d'autres sons de provenances diverses) à la composition de pièces entières à l'aide d'un seul modèle. On constate que les travaux utilisant le système CORDIS-ANIMA de la façon la plus poussée ont majoritairement été réalisés par des utilisateurs réguliers de l'environnement, travaillant pour la plupart dans le groupe ACROE - Laboratoire ICA. Les connaissances et le savoir-faire propres à GENESIS ont principalement été développés dans son « lieu de naissance », ce qui s'explique de façon très pragmatique par le fait que l'environnement n'a pas jusqu'à présent bénéficié d'une large diffusion en raison de sa disponibilité limitée aux plateformes Silicon Graphics, actuellement de moins en moins répandue. Par ailleurs, il est évident que les outils manquaient pour transmettre l'expérience acquise d'un côté aux utilisateurs finaux. C'est précisément le rôle de l'environnement didactique, et particulièrement de l'Instrumentarium, que d'assurer cette transmission de la façon la plus complète et la plus objective que possible.

Cette thèse coïncide avec le portage de GENESIS sur les systèmes d'exploitation les plus utilisés actuellement : Windows, Mac OS X et Linux. Ces avancées simultanées marquent clairement le passage d'une phase consacrée à l'analyse et à l'expérimentation à une phase de large diffusion, caractérisée par une maturité supérieure de l'environnement à tous les niveaux (conceptuel, analytique, pratique, ergonomique), et qui offrira très prochainement l'occasion de confronter nos

propositions aux usages des utilisateurs. La typologie, que nous avons pratiquée intensivement et à de nombreux niveaux différents au cours de cette thèse, n'est pas une science exacte. Ainsi, la formalisation de l'Instrumentarium GENESIS que nous avons réalisée sera, comme nous le savions dès le début de nos travaux, certainement amenée à évoluer en fonction des nouvelles pratiques qui ne manqueront pas de se mettre en place dans l'avenir ou du développement de nouveaux composant, comme ceux relatifs à l'Initialisation et au « geste » de sélection, qui n'en sont encore qu'à leur débuts et font, selon nous, partie des toutes prochaines pistes à explorer. Les bases sont désormais posées pour que la modélisation physique masses-interactions se répande et devienne l'un des outils courants du musicien faisant appel aux nouvelles technologies.

Bibliographie

[Adrien 1988] ADRIEN Jean-Marie. *Etude de structures complexes vibrantes, application à la synthèse par modèles physiques*. Thèse de doctorat. Université Paris VI, Paris, 1988.

[Amatriain&al. 2002] AMATRIAIN, Xavier, ARUM Pau, RAMIREZ Miguel. CLAM, yet another library for audio and music processing? *Companion of the 17th annual ACM SIGPLAN Conf. on Object-oriented Prog., Systems, Languages, and Applications* (Seattle, Etat-Unis, 4-8 novembre 2002).

[Andreatta 2003] ANDREATTA Moreno. *Méthodes algébriques en musique et musicologie du XXe siècle : aspects théoriques, analytiques et compositionnels*. Thèse de doctorat. Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, Paris, 2003.

[Arfib 1978] ARFIB Daniel. Digital Synthesis of Complex Spectra by means of Non-linear Distorted Sine Waves. *Proceedings of the 1978 International Computer Music Conference*. Evanston : Northwestern University Press, 1978.

[Arfib 1979] ARFIB Daniel. Digital Synthesis of Complex Spectra by Means of Multiplication of Nonlinear Distorted Sine Waves. *Journal of the Audio Engineering Society*, 1979, Vol. 27, Num. 10, p. 757-768.

[Arfib&Delprat 1993] ARFIB Daniel, DELPRAT Nathalie. Musical Transformations Using the Modification of Time-Frequency Images. *Computer Music Journal*, 1993, Vol. 17, Num. 2, p. 66–72.

[Assayag&al. 1997] ASSAYAG Gérard, AGON Carlos, FINEBERG Joshua, HANAPPE Peter. An Object-Oriented Visual Environment for Musical Composition. *Proceedings of the 1997 International Computer Music Conference (*Thessaloniki, Grèce, 25-30 septembre 1997). San Francisco : ICMA, 1997, p. 364–367.

[Bakan & al. 1990] BAKAN Michael B., BRYANT Wanda, LI Guangming, MARTINELLI David, VAUGHN Kathryn. Demystifying and Classifying Electronic Music Instruments. *Selected Reports in Ethnomusicology*, Vol. 8. Los Angeles : University of California, 1990, p. 37-64.

[Beauchamp 1979] BEAUCHAMP James. Brass Tone Synthesis by Spectrum Evolution Matching with Nonlinear Functions. *Computer Music Journal*, 1979, Vol. 3, Num. 2, p. 35-43.

[Beck 2000] BECK Stephen David. Designing Acoustically Viable Instruments in Csound. *The Csound Book*. Ed. par Richard Boulanger. Cambridge (Massachusetts) : MIT Press, 2000, p. 155-170.

[Berg&al. 1980] BERG Paul, Rowe Robert, Theriault David. SSP and Sound Description. *Computer Music Journal*, 1980, Vol. 4, Num. 1, p. 25–35.

[Berg 1996] BERG Paul. Abstracting the Future: The Search for Musical Constructs, *Computer Music Journal*, 1996, Vol. 20, Num. 3, p. 24-27.

[Bidlack 1992] BIDLACK Rick. Chaotic Systems as Simple (but Complex) Compositional Algorithms. *Computer Music Journal*, 1992, Vol. 16, Num. 3, p. 33–47.

[Bolognesi 1983] BOLOGNESI Tommaso. Automatic Composition: Experiments with Self-Similar Music. *Computer Music Journal*, 1983, Vol. 7, Num. 1, p. 25–36.

[Boulanger 2000] BOULANGER Richard (Ed). *The Csound Book.* Cambridge (Massachusetts) : MIT Press, 2000, 782 p.

[Bresin&Friberg 2000] BRESIN Roberto, FRIBERG Anders. Emotional Coloring of Computer-Controlled Music Performances. *Computer Music Journal*, 2000, Vol. 24, Num. 4, p. 44–61.

[Brutel&Cadoz 2001] BRUTEL-VUILMET Claire, CADOZ Claude. *Manuel d'utilisation pour GENESIS*. Grenoble : ACROE, 2001, 76 p.

[Bresson 2007] BRESSON Jean. *La synthèse sonore en composition musicale assistée par ordinateur - Modélisation et écriture du son*. Th : Informatique : Université Paris VI - Pierre et Marie Curie : 2007, 278 p.

[Burton&Vladimirova 1999] BURTON, Anthony R., VLADIMIROVA Tanya: Generation of Musical Sequences with Genetic Techniques. *Computer Music Journal*, 1999, Vol. 23, Num. 4, p. 59–73.

[Buxton&al. 1982] BUXTON W., Patel S., Reeves W., Baecker R. Objed and the Design of Timbral Resources. *Computer Music Journal*, 1982, Vol. 6, Num. 2, p. 32–44.

[Cadoz&al. 1981] CADOZ Claude, LUCIANI Annie, FLORENS Jean-Loup. Synthèse musicale par simulation des mécanismes instrumentaux. Transducteurs Gestuels Rétroactifs pour l'étude du jeu instrumental. *Revue d'Acoustique*, Vol. 59, p. 279–292

[Cadoz&al. 1984] CADOZ Claude, LUCIANI Annie, FLORENS Jean-Loup. Responsive Input Devices and Sound Synthesis by Simulation of Instrumental Mechanismes: The Cordis System. *Computer Music Journal*, 1984, Vol. 8, Num. 3, p. 60–73.

[Cadoz&al. 1993] CADOZ Claude, LUCIANI Annie, FLORENS Jean-Loup. CORDIS-ANIMA: A Modeling and Simulation System for Sound and Image Synthesis-The General Formalism. *Computer Music Journal*. 1993. Vol. 17, Num. 1, p. 19–29.

[Cadoz&al. 1994] CADOZ Claude, LUCIANI Annie, FLORENS Jean-Loup. Physical Models for Music and Animated imag. The use of CORDIS-ANIMA in "ESQUISSES" a Music Film by ACROE. *Proceedings of the 1994 International Computer Music Conference* (Aarhus, Danemark, 12-17 septembre 1994). San Francisco : ICMA, 1994, p. 11-18.

[Cadoz 1990] CADOZ Claude. Simuler pour connaître, Connaître pour simuler. *Actes du Colloque International sur les Modèles Physiques* (Grenoble, France, 19-21 septembre 1990). Grenoble : ACROE, 1990.

[Cadoz 1991] CADOZ Claude. Timbre et Causalité. *Le timbre, métaphore pour la composition*. Ed. par Jean-Baptiste Barrière. Paris : Christian Bourgeois, IRCAM, 1991.

[Cadoz 1999a] CADOZ Claude. Musique, geste, technologie. *Les nouveaux gestes de la musique*, éd. par Hugues Genevois et Raphaël de Vivo. Marseille : Parenthèses, 1999, 193 p.

[Cadoz 1999b] CADOZ Claude. Continuum énergétique du geste au son - simulation multisensorielle interactive d'objets physiques. *Interfaces homme-machine et création musicale*. Ed. par Hugues Vinet et François Delalande. Paris : Hermès, 1999.

[Cadoz 2002a] CADOZ Claude. Le Modèle Physique, métaphore pour la création musicale. *Actes des 9èmes Journées d'Informatique Musicale* (Marseille, France, 29-31 mai 2002). Marseille : GMEM, 2002.

[Cadoz 2002b] CADOZ Claude. The Physical Model as Metaphor for Musical Creation "*pico..TERA*", a piece entirely generated by physical model. *Proceedings of the 2002 International Computer Music Conference* (Göteborg, Suède, 16-21 Septembre 2002). San Francisco : ICMA, 2002.

[Cadoz 2002c] CADOZ Claude. *Les réalités virtuelles*. Paris : Flammarion, 2002, 125 p. (Dominos)

[Cadoz 2007] CADOZ Claude. Musical Creation Process and Digital Technology – « the Supra-Instrumental Gesture ». *Proceedings of the 4th International Conference on Enactive Interfaces* (Grenoble, France, 19-24 novembre 2007). Grenoble : ACROE, 2007, p. 323-328.

[Castagne&Cadoz 2000] CASTAGNE Nicolas, CADOZ Claude. Physical Modeling Synthesis : Balance Between Realism and Computing Speed. *Proceedings of the COST G-6 Conference on Digital Audio Effects (DAFx-00)*. (Vérone, Italie, 7-9 décembre 2000).

[Castagné&Cadoz 2002] CASTAGNE Nicolas, CADOZ Claude. Creating Music By Means of "Physical Thinking": The Musician Oriented GENESIS Environment. *Proceedings of the 5th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-20)*. (Hambourg, Allemagne, 26-28 décembre 2002).

[Castagne&Cadoz 2003] CASTAGNÉ Nicolas, CADOZ Claude. 10 Criteria for Evaluating Physical Modelling Schemes for Music Creation. *Proceedings of the 6th Conference on Digital Audio Effects (DAFX-03)* (Londres, Angleterre, 8-11 septembre 2003).

[Castagné 2002] CASTAGNE Nicolas. *GENESIS, un environnement pour la création musicale à l'aide de modèles physiques particulaires.* Th : Acoustique, Traitement du signal et Informatique Appliqués à la Musique : Grenoble INP : 2002, 474 p.

[Chafe 2004] CHAFE, Chris. Case Studies of Physical Models in Music Composition. *Proc. 18th Intl. Cong. Acoustics (ICA)* (Kyoto, Japon, 4-7 avril 2004). Tokyo: The Acoustical Society of Japan.

[Chowning 1973] CHOWNING John. The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation. *Journal of the Audio Engineering Society*, 1973, Vol. 21, Num. 7, p. 526–534.

[Cook&Scavone 1999] COOK Perry R., SCAVONE Gary P. The synthesis toolkit (STK). *Proceedings of the 1999 International Computer Music Conference* (Pékin, Chine, 22-27 octobre 1999) San Francisco : ICMA, 1999, p. 164-166.

[Couroussé 2003] COUROUSSE Damien. *Développement d'une librairie de modèles et de composants pour un instrumentarium virtuel dans l'environnement de création musicale par modèles physiques GENESIS.* Grenoble : Mémoire de DEA « Sciences Cognitives » : Grenoble INP : 2003, 125 p.

[Couroussé 2008] COUROUSSE Damien. *HPU « Haptic Processor Unit » : Une Plate-forme Transportable pour la Simulation Temps-Réel Synchrone Multisensorielle.* Th : Art, Science et Technologie : Grenoble INP : 2008.

[Cuzzucoli&Lombardo 1999] CUZZUCOLI Giuseppe, LOMBARDO Vincenzo. A Physical Model of the Classical Guitar, Including the Player's Touch. *Computer Music Journal*, 1999, Vol. 23, Num. 2, p. 52–69.

[Dannenberg 1997] DANNENBERG Roger B. Machine Tongues XIX: Nyquist, a Language for Composition and Sound Synthesis. *Computer Music Journal*, 1997, Vol. 21, Num. 3, p. 50–60.

[Davies 1985] DAVIES Hugh. *The Musical Times*, Vol. 126, No. 1708. (Jun., 1985), p. 332-333.

[Decker&al. 1986] DECKER Shawn. L., KENDALL Gary S., SCHMIDT Brian L., LUDWIG M. Derek., FREED Daniel. J. A Modular Environment for Sound Synthesis and Composition. *Computer Music Journal*, 1986, Vol. 10, Num. 4, p. 28–41.

[DePoli 1996] DE POLI Giovanni. In Search of New Sounds. *Computer Music Journal*, 1996, Vol. 20, Num. 2, p. 39–43.

[Diener 1989] DIENER Glendon. TTrees: A Tool for the Compositional Environment. *Computer Music Journal*, 1989, Vol. 13, Num. 2, p. 77–85.

[Djoharian 1993] DJOHARIAN Pirouz. Generating Models for Modal Synthesis. *Computer Music Journal*, 1993, Vol. 17, Num. 1, p. 57-65.

[Djoharian 1999] DJOHARIAN Pirouz. Material Design in Physical Modeling Sound Synthesis. *Proceedings of the 2nd COST G-6 Workshop on Digital Audio Effects (DAFx-99)* (Trondheim, Norvège, 9-11 décembre 1999).

[Dodge 1988] DODGE Charles. Profile: A Musical Fractal. *Computer Music Journal*, 1988, Vol. 12, Num. 3, p. 10–14.

[Dolson 1986] DOLSON Mark. The Phase Vocoder: A Tutorial. *Computer Music Journal*, 1986, Vol. 10, Num. 4, p. 14–27.

[Dolson1989] DOLSON Mark. Machine Tongues XII: Neural Networks. *Computer Music Journal*, 1989, Vol. 13, Num. 3, p. 28–40.

[Durand 2002] DURAND Daniel. *La systémique*, 9ème éd. Paris : PUF, 2002, 127 p. (Que sais-je ?)

[Enactive] Site web du projet européen ENACTIVE Network. Disponible sur : https://www.enactivenetwork.org/

[Ethington&Punch 1994] ETHINGTON Russ, PUNCH Bill. SeaWave: A System for Musical Timbre Description. *Computer Music Journal*, 1994, Vol. 18, Num. 1, p. 30–39.

[Feiten&Günzel 1994] FEITEN Bernhard, GÜNZEL Stefan. Automatic Indexing of a Sound Database Using Self-Organizing Neural Nets. *Computer Music Journal*, 1994, Vol. 18, Num. 3, p. 53-65.

[Florens&Cadoz 1990] FLORENS Jean-Loup, CADOZ Claude. Modular Modelisation and Simulation of the Instrument. *Proceedings of the 1990 International Computer Music Conference* (Glasgow, Ecosse, 10-15 Septembre 1990). San Francisco : ICMA, 1990, p. 75–78.

[Fourcade 1999] FOURCADE Patrick, CADOZ, Claude. Generating /p/,/t/,/k/ consonants by a physical modeling of musical percussion. *Proceedings of the eighth International Workshop on the*

cognitive science of natural language processing (Galway, Irlande, 9-11 août 1999), p. 216-223.

[Fourcade 2001] FOURCADE Patrick. *Etude et simulation des phénomènes percussifs dans les instruments de musique*. Thèse de Doctorat. Université de la Méditerranée – Aix Marseille II, 2001, 196 p.

[Friberg 1991] FRIBERG Anders. Generative Rules for Music Performance. *Computer Music Journal*, 1991, Vol. 15, Num. 2, p. 56–71.

[Galpin 1937] GALPIN Francis. *A textbook of European musical instruments: Their origins, history, and character*. Londres : Williams and Nowgate, 1937.

[Gordon&Grey 1978] GORDON John W., GREY John M. Perception of Spectral Modifications on Orchestral Instrument Tones. *Computer Music Journal*, 1978, Vol. 2, Num. 1, p. 24-31.

[Grey&Moorer 1977] Grey, J. J. A. Moorer: "Perceptual Evaluations of Synthesized Musical Instrument Tones". *Journal of the Acoustical Society of America*, 1977, Vol. 62, Num. 2, p. 454-462.

[Griffiths 1992] GRIFFITHS Paul. *Brève histoire de la musique moderne.*. Paris : Fayard, , 1992.en Sciences Sociales, 1994, 183 p. (Les chemins de la musique)

[Henry 2004] HENRY Cyrille. Pmpd : Physical Modelling for Pure Data. *Proceedings of the 2004 International Computer Music Conference* (Coral Gables, Etats-Unis, 1-6 novembre 2004). San Francisco : ICMA, 2004.

[Hiller&Isaacson 1959] HILLER Lejarnen, ISAACSON Leonard. *Experimental Music : Composition with an electronic computer*. New York: McGraw-Hill, 1959, 197 p.

[Holtzman 1979] HOLTZMAN, S. R. An Automated Digital Sound Synthesis Instrument. *Computer Music Journal*, 1979, Vol. 3, Num. 2, p. 53–61.

[Hornbostel&Sachs 1914] HORNBOSTEL Erich M. von, SACHS Curt. Systematik der Musikinstrumente: Ein Versuch. *Zeitschrift für Ethnologie*, 1914. Traduit en anglais (trad. Baines, Wachsmann) : A classification of Musical Instruments. *Galpin Society Journal*, 1961, Vol 14. p. 3-29.

[Horner&Beauchamp 1996] HORNER Andrew, BEAUCHAMP James. Piecewise-Linear Approximation of Additive Synthesis Envelopes: A Comparison of Various Methods. *Computer Music Journal*, 1996, Vol. 20. Num. 2, p. 72–95.

[Howard&al. 2002] HOWARD David, RIMELL Stuart, HUNT Andy, KIRK Ross, TYRRELL Andy M. Tactile Feedback in the Control of a Physical Modelling Music Synthesiser. *Proceedings of the 7th International Conference on Music Cognition and Perception* (Sydney, Australie, 17-21 juillet 2002).

[Incerti 1996] INCERTI Eric. *Synthèse de Sons par Modélisation Physique de Structure Vibrantes. Applications pour la Création Musicale par Ordinateur.*Thèse de doctorat Informatique : Grenoble INP : 1996, 249 p.

[Jaffe 1995] JAFFE David A. Ten Criteria for Evaluating Digital Synthesis Techniques. *Computer Music Journal*, 1995, Vol. 19, Num. 1, p. 76–87.

[Jairazbhoy 1990] JAIRAZBHOY Nazir Ali. The Beginnings of Organology and Ethnomusicology in the West:

V. Mahillon, A. Ellis and S. M. Tagore. *Selected Reports in Ethnomusicology*, Vol. 8. Los Angeles : University of California, 1990, p. 67-80.

[Jones 1981] JONES Kevin. Compositional Applications of Stochastic Processes. *Computer Music Journal*, 1981, Vol. 5, Num. 2, p. 45–61.

[Karplus&Strong 1983] KARPLUS Kevin, STRONG Alex. Digital Synthesis of Plucked-String and Drum Timbres. *Computer Music Journal*, 1983, Vol. 7, Num. 2, p. 43–55.

[Kartomi 1990] KARTOMI Margaret J. *On Concepts and Classifications of Musical Instruments*. Chicago : The University of Chicago Press, 1990, 329 p. (Chicago Studies in Ethnomusicology)

[Kendall&al. 1986] KENDALL Gary S., ASHLEY Richard D., BARRIERE Jean-Baptiste, DANNENBERG Roger B., MOORE F. Richard, RISSET Jean-Claude, SMALLEY Denis, TRUAX Barry. Essays on the 1986 International Computer Music Conference. *Computer Music Journal*, 1987, Vol. 11, Num. 2, p. 35-48

[Kendall 1981] KENDALL Gary S. Composing from a Geometric Model: Five-Leaf Rose. *Computer Music Journal*, 1981, Vol. 5, Num. 4, p. 66–73.

[Kontogeorgakopoulos&Cadoz 2005] KONTOGEORGAKOPOULOS Alexandros, CADOZ Claude. Digital Audio Effects and Physical Modeling. *Proceedings of the second Sound and Music Computing Conference (SMC'05)* (Salerne, Italie, 24-26 novembre 2005).

[Kontogeorgakopoulos&Cadoz 2007a] KONTOGEORGAKOPOULOS Alexandros, CADOZ Claude. Physical Modeling As A Proposed Framework For The Conception, The Design And The Implementation Of Sound Transformations. *Proceedings of the 2007 International Computer Music Conference* (Copenhague, Danemark, 27-31 août 2007). San Francisco : ICMA, 2007.

[Kontogeorgakopoulos&Cadoz 2007b] KONTOGEORGAKOPOULOS Alexandros, CADOZ Claude. Filtering Within The Framework Of Mass-Interaction Physical Modeling And Of Haptic Gestural Interaction. *Proc. of the 10th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-07)* (Bordeaux, France, 10-15 septembre 2007). Bordeaux : Labri, 2007, p. 319-325.

[Kontogeorgakopoulos 2008] KONTOGEORGAKOPOULOS, Alexandros. *Theory and Practice of Physical Modeling for Musical Sound Transformation : An Instrumental Approach to Digital Audio Effects Based on the CORDIS-ANIMA system*. Th : Art, Science et Technologie : Grenoble INP : 2008, 120 p.

[Kronland-Martinet 1988] KRONLAND-MARTINET Richard. The Wavelet Transform for Analysis, Sythesis, and Processing of Speech and Music Sounds. *Computer Music Journal*, 1988, Vol. 12, Num. 4, p. 11–20.

[Laurson&Kuuskankare 2002] LAURSON Mikael, KUUSKANKARE Mika. PWGL: A Novel Visual Language based on Common Lisp, CLOS and OpenGL. *Proceedings of the 2002 International Computer Music Conference* (Göteborg, Suède, 16-21 Septembre 2002). San Francisco : ICMA, 2002, p. 142-145.

[Le Moigne 1994] LE MOIGNE Jean-Louis. *La théorie du système général. Théorie de la modélisation*. 4ème éd. Paris : PUF, 1994, 352 p.

[Lerdahl&Jackendoff 1983] LERDAHL Fred, JACKENDOFF Ray. *A generative theory of tonal music*, Cambridge (Massachusetts) : MIT Press, 1983.

[Lorrain 1980] LORRAIN Denis. A Panoply of Stochastic 'Cannons'. *Computer Music Journal*, 1980, Vol. 4, Num. 1, p. 53–81.

[Loy 1989] LOY Garreth. Composing with Computers-a Survey of Some Compositional Formalisms and Music Programming Languages. *Current Directions in Computer Music Research.* Cambridge (Massachusetts) : MIT Press, 1989, p. 291–396.

[Luciani 2002] LUCIANI Annie. MIMESIS - Du théâtre d'ombres à l'ordinateur Vers un art visuel dynamique. *Monaco dance forum* (Monaco 10 décembre 2002).

[Mathews 1969] MATHEWS Max V. *The Technology of Computer Music*. Cambridge (Massachusetts) : MIT Press, 1969, 196 p.

[Mathews&Moore 1970] MATHEWS Max V, MOORE F. Richard. GROOVE - a program to compose, store, and edit functions of time. *Communications of the ACM*, 1970, Vol. 13, Num. 12, p. 715 – 721.

[McCartney 1996] McCARTNEY, James. SuperCollider: A New Real-Time Sound Synthesis Language. *Proceedings of the 1996 International Computer Music Conference* (Hong Kong, 19-24 août 1996). San Francisco : ICMA, 1996, p. 257–258.

[McMillen 1994] McMILLEN, Keith. ZIPI: Origins and Motivations. *Computer Music Journal*, 1994, Vol. 18, Num. 4, p. 47–51.

[Mikelson 2000] MIKELSON Hans. Modeling "Classic" Electronic Keyboards in Csound. *The Csound Book*. Ed. par Richard Boulanger. Cambridge (Massachusetts) : MIT Press, 2000, p. 207-219.

[Monro&Pressing 1998] MONRO Gordon, PRESSING Jeff. Sound Visualization Using Embedding: The Art and Science of Auditory Autocorrelation. *Computer Music Journal*, 1998, Vol. 22, Num. 2, p. 20–34.

[Moore1988] MOORE F. Richard. The Dysfunctions of MIDI. *Computer Music Journal*, 1988, Vol. 12, Num. 1, p. 19–27.

[Moorer 1977] MOORER James A. Signal Processing Aspects of Computer Music - A Survey. *Computer Music Journal*, 1977, Vol. 1, Num. 1, p. 4–37.

[Moorer&al. 1978] MOORER James, GREY John, STRAWN John. Lexicon of Analyzed Tones. Part 3 : the Trumpet. *Computer Music Journal*, 1978, Vol. 2, Num. 2, p. 23–31.

[Morrill1977] MORILL Dexter. Trumpets Algorithms For Computer Composition. *Computer Music Journal*, 1977, Vol. 1, Num. 1, p. 46–52.

[Munoz 2005] MUNOZ Simon. *Etude de structures simples pour la composition avec GENESIS.* Mémoire de Master 2R « Information Cognition et Apprentissage » : Grenoble INP : 2005, 107 p.

[Myhill 1979] MYHILL John. Controlled Indeterminacy - A First Step Towards a Semi-Stochastic Music Language. *Computer Music Journal*, 1979, Vol. 3, Num. 3, p. 12–14.

[Nattiez 1975] NATTIEZ Jean-Jacques. *Fondements d'une sémiologie de la musique*. Paris : Union Générale d'Editions, 1975, 448 p. (Collection 10/18)

[Novello 2004] NOVELLO Alberto. *Etude de la production de bruits par modèle physique particulaire*. Mémoire de Master 2R « Information Cognition et Apprentissage » : Grenoble INP : 2004, 99 p.

[O'Leary&Griffith 2003] O'LEARY Sean, Griffith Niall J. L. A hybrid approach to timbral consistency in a virtual instrument. *Proceedings of the 6th Conference on Digital Audio Effects (DAFX-03)* (Londres, Angleterre, 8-11 septembre 2003).

[Oppenheim 1996] Oppenhein, D. V. DMIX: A Multifaceted Environment for Composing and Performing Computer Music. *Computers & Mathematics with Applications*, 1996, Vol. 32, Num. 1, p. 117–135.

[Pearson&Howard 1995] PEARSON Mark, HOWARD David M. A musicians approach to physical modelling. *Proceedings of the 1995 International Computer Music Conference* (Banff, Canada, 3-7 septembre 1995), San Francisco : ICMA, 1995, p. 578–580.

[Penttinen&al. 2001] PENTTINEN Henri, KARJALAINEN Mati, HÄRMÄ Aki. Morphing Instrument Body Models. *DAFX-01 Proceedings*, (Limerick, Irlande, 6-8 décembre 2001).

[Pirot&Toussaint 2004] PIROT Manuel, TOUSSAINT Lionnel. *Instrumentarium GENESIS : Développement d'une librairie de modèles pour un instrumentarium virtuel dans l'environnement de création musicale par modèles physiques GENESIS*. Rapport de stage, 3e année, Département télécommunications (ENSERG-ENSIMAG). Grenoble INP : 2004, 118 p.

[Pope 1991] POPE Stephen Travis. *The Well-Tempered Object*. Cambridge (Massachusetts) : MIT Press, 1991, 193 p.

[Pope 1993] POPE Stephen Travis. Machine Tongues XV: Three Packages for Software Sound Synthesis. *Computer Music Journal*, 1993, Vol. 17, Num. 2, p. 23–54.

[Poyer&Cadoz 2007] POYER François, CADOZ Claude. Self-Sustained Vibrating Structures Physical Modelling By Means Of Mass-Interaction Networks. *Proc. of the 10th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-07)* (Bordeaux, France, 10-15 septembre 2007). Bordeaux : Labri, 2007, p. 311-318.

[Pressing 1988] PRESSING Jeff. Nonlinear Maps as Generators of Musical Design. *Computer Music Journal*, 1988, Vol. 12, Num. 2, p. 35–46.

[Puckette 1988] PUCKETTE Miller. The Patcher. *Proceedings of the 1988 International Computer Music Conference* (Cologne, Allemagne, 20-25 septembre 1988). San Francisco : ICMA, 1988.

[Puckette 1996] PUCKETTE Miller. Pure Data. *Proceedings of the 1996 International Computer Music Conference* (Hong Kong, 19-24 août 1996). San Francisco : ICMA, 1996, p. 269-272.

[Puckette 2007] PUCKETTE Miller. *The Theory and Technique of Electronic Music*. World Scientific Publishing Co, 2007, 348 p.

[Rahn 1990] RAHN John. The Lisp Kernel, A Portable Software Environment for Composition. *Computer Music Journal*, 1990, Vol. 14, Num. 4, p. 42–58.

[Risset 1991] RISSET Jean-Claude. Composer le son : expériences avec l'ordinateur, 1964-1989. *Contrechamps*, 1991, Vol. 11, p. 107–126.

[Risset 1999] RISSET Jean-Claude. Discours pour la remise de la Médaille d'Or du CNRS, Paris, 28 novembre 1999. (http://www.cnrs.fr/cw/fr/pres/compress/risset2.htm)

[Roads 1979] ROADS Curtis. Grammars as Representations for Music. *Computer Music Journal*, 1979, Vol. 3, Num. 1, p. 48–55.

[Roads 1980a] ROADS Curtis. Interview with Max Mathews. *Computer Music Journal*, 1980, Vol. 4, Num. 4, p. 15–22.

[Roads 1980b] ROADS Curtis. Artificial Intelligence and Music. *Computer Music Journal*, 1980, Vol. Num. 4, p. 13–25.

[Röbel 2001] RÖBEL Axel. Synthesizing Natural Sounds Using Dynamic Models of Sound Attractors. *Computer Music Journal*, 2001, Vol. 25, Num. 2, p. 46–61.

[Rocchesso 1995] ROCCHESSO Davide. The Ball within the Box: A Sound-processing Metaphor. *Computer Music Journal*, 1995, Vol. 19, Num. 4, p. 47–57.

[Rodet&al. 1984] RODET Xavier, POTARD Yves, BARRIERE Jean-Baptiste. The CHANT Project: From the Synthesis of the Singing Voice to Synthesis in General. *Computer Music Journal*, 1984, Vol. 8, Num. 3, p. 15-31.

[Rodet&al. 1995] RODET Xavier, DEPALLE Philippe, GARCIA Guillermo. New Possibilities in Sound Analysis and Synthesis. *ISMA'95 Proceedings - International Symposium on Musical Acoustic*, (Le Normont, Dourdan, 2-6 Juillet 1995), Paris: Société Française d'Acoustique, p. 422–432.

[Rodet&Cointe 1984] RODET Xavier, COINTE Pierre. FORMES: Composition and Scheduling of Processes. *Computer Music Journal*, 1984, Vol. 8, Num. 3, p. 32–50.

[Rolland&Pachet 1996] ROLLAND Pierre-Yves, PACHET François. A Framework for Representing Knowledge about Synthesizer Programming. *Computer Music Journal*, 1996, Vol. 20, Num. 3, p. 47–58.

[Rolnick 1978] ROLNICK, N. B. A Composers's Notes on the Development and Implementation of Sotware for a Digital Synthesizer. *Computer Music Journal*, 1978, Vol. 2, Num. 2, p. 13–22.

[Rozenberg 1979] ROZENBERG Maurice. Microcomputer-controlled Sound Processing Using Walsh Functions. *Computer Music Journal*, 1979, Vol. 3, Num. 1, p. 42–47.

[Russolo 1913] RUSSOLO Luigi. *L'arte dei rumori*. Milan, Edizioni futuriste di Poesia, 1916.

[Sachs 1940] SACHS Curt. *The History of Musical Instruments*. New York : W. W. Norton, 1940.

[Sakurai 1981] SAKURAI Tetsuo. The Classification of Musical Instruments Reconsidered. *Bulletin of the National Museum of Ethnology* (Japon), 1981, Vol. 6, Num. 4, p. 824-830.

[Sano&Jenkins 1989] SANO Hajime, JENKINS B. Keith. A Neural Network Model for Pitch Perception. *Computer Music Journal*, 1989, Vol. 13, Num. 3, p. 41–48.

[Sasaki&Smith 1980] SASAKI Lawrence. H., SMITH Kenneth C. A Simple Data Reduction Scheme For Additive Synthesis. *Computer Music Journal*, 1980, Vol. 4, Num. 1, p. 22–24.

[Scaletti 1985] SCALETTI Carla. The CERL Music Project at the University of Illinois. *Computer Music Journal*, 1985, Vol. 9, Num. 1, p. 45–58.

[Scaletti 1989] SCALETTI Carla. The Kyma/Platypus Computer Music Workstation. *Computer Music Journal*, 1989, Vol. 13, Num. 2, p. 23–38.

[Schaeffer 1966] SCHAEFFER Pierre. *Traité des objets musicaux*. Paris : Editions du Seuil, 1966, 672 p.

[Schaeffner 1994] SCHAEFFNER André. *Origine des Instruments de Musique*, 2ème éd. Paris : Editions de l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, 1994.

[Schmidt 1987] SCHMIDT, Brian L. A Natural Language System for Music. *Computer Music Journal*, 1987, Vol. 11, Num. 2, p. 25–34.

[Serra&Smith 1990] SERRA Xavier, SMITH Julius Orion. Spectral Modeling Synthesis: A Sound Analysis/Synthesis System Based on a Deterministic plus Stochastic Decomposition. *Computer Music Journal*, 1990, Vol. 14, Num. 4, p. 12–24.

[Smith 1991] SMITH Julius Orion. Viewpoints on the History of Digital Synthesis. *Proceedings of the 1991 International Computer Music Conference* (Montréal, Canada, 16-20 octobre 1991). San Francisco: ICMA, 1991, p. 1–10.

[Smith 1996] SMITH Julius Orion. Physical Modeling Synthesis Update. *Computer Music Journal*, 1996, Vol. 20, Num. 2, p. 44–56.

[Smith 2004] SMITH Julius Orion. Virtual Acoustic Musical Instruments: Review and Update. *Journal of New Music Research*, 2004, Vol. 33, Num. 3, p. 283-304.

[Strawn 1980] STRAWN John. Approximation and Syntactic Analysis of Amplitude and Frequency Functions for Digital Sound Synthesis. *Computer Music Journal*, 1980, Vol. 4, Num. 3, p. 3-24.

[Szilas&Cadoz 1998] SZILAS Nicolas, CADOZ Claude. Analysis Techniques for Physical Modeling Networks. *Computer Music Journal*, 1998, Vol. 22, Num. 3, p. 33–48.

[Tache&Cadoz 2006a] TACHE Olivier, CADOZ Claude. Using Evolving Physical Models for Musical Creation in the GENESIS Environment. *Proceedings of the third Sound and Music Computing Conference (SMC'06)* (Marseille, France, 18-20 mai 2006). Marseille : GMEM, 2006, p. 53-60.

[Tache&Cadoz 2006b] TACHE Olivier, CADOZ Claude. Generation of Complex Sound Sequences Using Physical Models with Dynamical Structures. *Proceedings of the 2006 International Computer Music Conference* (La Nouvelle-Orléans, Etats-Unis, 6-11 novembre 2006). San Francisco : ICMA, 2006, p. 1-8.

[Tache 2004] TACHE Olivier. *Utilisation des liaisons non linéaires pour la construction d'objets évolutifs dans l'environnement de création musicale GENESIS*. Mémoire de Master 2R « Information Cognition et Apprentissage » : Grenoble INP : 2004, 66 p.

[Taube 1991] TAUBE Heinrich. Common Music: A Music Composition Language in Common Lisp and CLOS. *Computer Music Journal*, 1991, Vol. 15, Num. 2, p. 21–32.

[Thil 2003] THIL François. *Simulations de collisions et applications à la synthèse d'objets sonores et percussifs*. Mémoire de DEA « Signal, Image, Parole, Télécommunications » : Grenoble INP : 2003, 82 p.

[TLFi] Le Trésor de la Langue Française informatisé. Dictionnaire. Disponible sur : http://atilf.atilf.fr/tlf.htm

[Todd 1989] TODD Peter M. A Connectionist Approach to Algorithmic Composition. *Computer Music Journal*, 1989, Vol. 13, Num. 4, p. 27–43.

[Truax 1977] TRUAX Barry. Organizational Techniques for C:M ratios in Frequency Modulation. *Computer Music Journal*, 1977, Vol. 1, Num. 4, p. 39–45.

[Truchet&al. 2001] TRUCHET Charlotte, AGON Carlos, CODOGNET Philippe. A Constraint Programming System for Music Composition, Preliminary Results. *Proceedings of the 2001 International Computer Music Conference* (La Havane, Cuba, 17-22 septembre 2001). San Francisco : ICMA, 2001.

[Uhl&al. 1995] UHL Claude, LUCIANI Annie, FLORENS Jean-Loup. Hardware architecture of a real-time simulator for the CORDIS ANIMA System : Physical Models, Images, Gestures, Sounds. *Computer graphics: developments in virtual environments*. Londres :Academic Press Ltd, 1995, p. 421-434.

[Vaggione 1996] VAGGIONE Horacio. Articulating Microtime. *Computer Music Journal*, 1996, Vol. 20, Num. 2, p. 33-38.

[Välimäki&al. 2005] VÄLIMÄKI Vesa, PAKARINEN Jyri, ERKUT Cumhur, KARJALAINEN Matti. Discrete-time modelling of musical instruments. *Reports On Progress In Physics*, 2005, Vol. 69, p. 1-78.

[Villeneuve 2008] VILLENEUVE Jérôme. *Problème inverse, résolution et intégration au sein de GENESIS*. Rapport de stage – Master 1 « Physique » : Université Joseph Fourier, Grenoble 1 : 2008.

[Wang&Cook 2003] WANG Ge, COOK Perry R. ChucK: A Concurrent, On-the-fly, Audio Programming Language. *Proceedings of the 2003 International Computer Music Conference* (Singapour, 29 septembre – 4 octobre 2003). San Francisco : ICMA, 2003.

[Wessel 1979] WESSEL, David. L. Timbre Space as a Musical Control Structure. *Computer Music Journal*, 1979, Vol. 3, Num. 2, p. 45–52.

[Wiener 1948] WIENER Norbert. *Cybernetics - Control and Communication in the Animal and the Machine*. Cambridge (Massachusetts) : MIT Press, 1948.

[Wright&al. 2003] WRIGHT Matthew, FREED Adrian, MOMENI Ali. OpenSound Control: State of the Art 2003". *Proceedings of the 2003 Conference on New Interfaces for Musical Expression* (Montréal, Canada, 22-24 mai 2003), p. 153–159.

[Xenakis 1971] XENAKIS, Iannis. *Formalized Music: Thought and Mathematics in Composition*. New York : Pendragon Press, 1971, 273 p.

Glossaire

Acoustique
Adjectif utilisé dans des situations mettant en jeu des phénomènes oscillatoires dont la fréquence est supérieure au seuil de l'audition (environ 20 Hz). Exemples : *échelle acoustique, fréquence acoustique*.

Archet
Composant d'Excitation constitué d'un module MAS et d'un module LNL visqueux simulant un frottement de type archet. La caractéristique LNLZ correspondante est représentée dans la Figure 15, p. 77.

Batteur
Cellule (cf. ci-dessous) accordée à une fréquence macro-temporelle utilisée pour percuter une autre structure à intervalles réguliers.

Butée double
Combinaison de deux modules BUT identiques de sens opposé ayant un seuil S<0. L'interaction résultante tend à contraindre les deux modules <MAT> ainsi reliés à conserver une distance inférieure à S (la « force » de cette contrainte étant liée au coefficient de raideur des modules BUT).

Cellule
Objet composé d'un module SOL et d'un module MAS reliés par un module REF. C'est l'équivalent numérique de l'oscillateur harmonique à un degré de liberté. Dans GENESIS, il peut être réalisé soit sous la forme explicite que nous venons de décrire, soit grâce à un module CEL.

Cellule TFP
Cellule dont les paramètres M, K et Z ont la même valeur, ce qui lui donne la propriété d'avoir, à tout instant n de la simulation, une position proportionnelle à la somme des forces reçues par son module MAS à l'instant n-1 – le coefficient de proportionnalité étant une constante. Cet objet agit donc comme un Transducteur Force-Position (TFP), d'où son nom. Cf. p. 252 pour plus de détails.

Chapelet
Structure en ligne dont tous les modules <MAT> sont connectés à exactement deux autres modules <MAT>, à l'exception des modules situés aux extrémités de la ligne qui n'ont qu'une seule connexion.

Chevalet
Cellule TFP (cf. ci-dessus) utilisée comme point d'attache d'une structure. Son inertie est d'une échelle supérieure à celle de la structure (par exemple 100 fois plus grande). Cf. p. 253 pour plus de détails.

Corde
Chapelet attaché à ses deux extrémités à des points fixes et dont les modes de vibrations sont (au moins partiellement) situés dans le domaine acoustique.

Doigt
Composant de Modification constitué d'un module MAS de très grande inertie connecté à un module BUT (cf. Figure 56, p. 203). Le Doigt permet « d'appuyer » sur une structure afin de modifier temporairement ses modes de vibration. Lorsque la vitesse avec laquelle il arrive sur la structure visée est suffisamment élevée, il peut provoquer une excitation selon un phénomène similaire à la technique du *tapping* pratiquée par certains guitaristes.

Domino
Structure maracassée utilisant des Butées doubles (cf. ci-dessus) configurés de façon à ce que lors d'un choc entre deux modules MAS, leurs vitesses s'échangent parfaitement. En général, seul un module <MAS> de la structure est initialement excité, son mouvement se propageant par « carreaux » successifs, à la manière de la chute d'une chaine de Dominos. Les Dominos peuvent être constitués d'un Chapelet ou d'un anneau (c'est-à-dire d'un Chapelet bouclé sur lui-même). Selon la façon dont ils sont excités, ils peuvent être « nomades » (ils s'éloignent indéfiniment de leur position initiale) ou au contraire stationnaires.

Gâchette
Objet composé d'un module MAS $\mathcal{M}$ relié à un module SOL $\mathcal{G}$ par un module LNL purement élastique (Figure 73), ayant une caractéristique LNLK telle que le comportement obtenu est le suivant :

- Lorsque la distance entre les modules $\mathcal{G}$ et $\mathcal{M}$ est inférieure à un seuil S, aucune force ne s'exerce entre eux.
- Lorsque la distance est supérieure au seuil, une force élastique répulsive s'exerce entre $\mathcal{M}$ et $\mathcal{G}$.

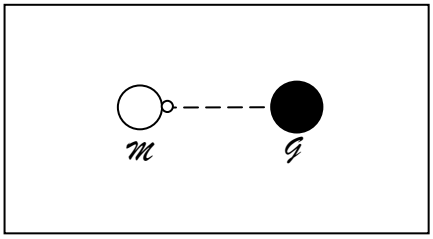


Figure 73: La Gâchette

Le seuil choisi est souvent très petit (de l'ordre de 10^{-9} par exemple). La Gâchette permet ainsi de déclencher un mouvement dès qu'un force (aussi petite soit-t-elle) est appliquée au module $\mathcal{M}$.

On peut utiliser n'importe quelle caractéristique LNLK (cf. Figure 74), pourvu qu'elle comporte une section centrale nulle de largeur 2S et que la force s'annule au-delà d'une certaine distance entre le module MAS et le module SOL (dans le cas contraire, l'interaction répulsive risque de provoquer la divergence de la simulation).

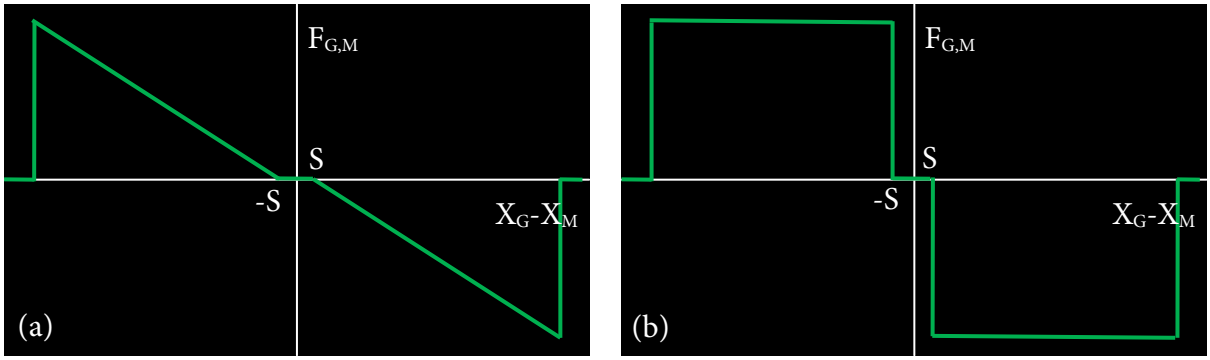


Figure 74 : Caractéristiques LNLK du module LNL de deux Gâchettes. (a) Gâchette « progressive » (la force croît avec la distance). (b) Gâchette « brutale » (la force est maximale dès que le seuil est franchi).

Liaison piège
Module LNL à élasticité non permanente qui simule une interaction viscoélastique linéaire lorsque que la distance entre les deux modules <MAT> connectés est inférieure à un certain seuil S ; lorsque la distance est supérieure à ce seuil, la force d'interaction est nulle (Figure 75).

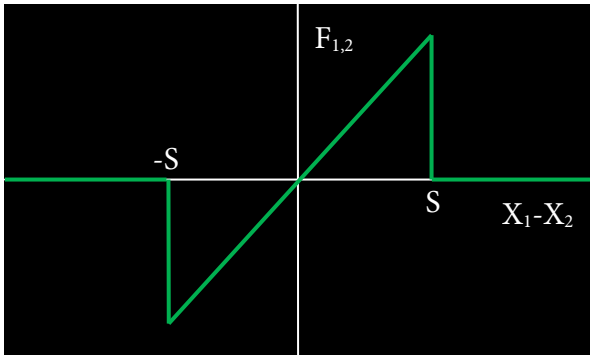


Figure 75 : Caractéristique LNLK d'une Liaison piège

Macro-temporel
Adjectif utilisés dans des situations mettant en jeu des phénomènes oscillatoires dont la fréquence est inférieure au seuil de l'audition (environ 20 Hz) ou des phénomènes non oscillatoires. Exemples : *objet macro-temporel, échelle macro-temporelle, fréquence macro-temporelle.*

Oreille
Composant de Captation constitué d'un Cellule TFP connectée d'une part à un module SOX et d'autre part à un certain nombre de structures acoustiques. La position de son module MAS étant proportionnelle à la somme des forces reçues (à un décalage d'un échantillon près), le signal capté par le module SOX est l'enregistrement du signal de force correspondant. L'Oreille était principalement utilisée pour la Captation de sources multiples ou en mouvement ; elle est maintenant remplacée par le module SOF qui a un coût algorithmique plus réduit et offre exactement la même fonction.

Percuteur élémentaire
Composant d'Excitation constitué d'un module MAS connecté à un module BUT. En règle générale, le module MAS a une vitesse initiale non nulle et le module BUT a une viscosité nulle.

Plectre
Composant d'Excitation constitué d'un module MAS connecté à un module LNL élastique simulant le pincement d'une structure par un plectre. Il s'agit essentiellement d'une interaction élastique avec seuil ; il en existe plusieurs versions, selon la caractéristique LNLK choisie. La plus courante est représentée dans la figure ci-dessous.

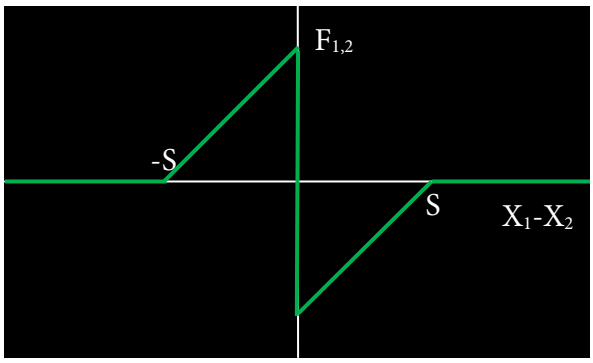


Figure 76 : Caractéristique LNLK du module LNL d'un Plectre

Serpent
Chapelet attaché à ses deux extrémités à des points fixes et dont les modes de vibrations sont (au moins partiellement) situés dans le domaine macro-temporel.

Annexes

Annexe 1. Paramètres et conditions initiales des modules GENESIS

On donne dans le tableau ci-dessous la liste complète des paramètres et des conditions initiales de chaque type de module disponible dans GENESIS.

Tableau 12 : Paramètres et conditions initiales des modules élémentaires GENESIS

Paramètres	Conditions initiales
Modules <MAT>	
MAS (**MAS**se)	
M : masse	X0 : position initiale V0 : vitesse initiale
SOL	
-	X0 : position
CEL (**CEL**lule)	
M : masse K : élasticité Z : viscosité	X0 : position initiale V0 : vitesse initiale
SOF (**SO**rtie de **F**orce)	
-	X0 : position
Modules <LIA>	
RES (**RES**sort)	
K : élasticité	-
FRO (**FRO**ttement)	
Z : viscosité	-
REF (**R**essort **E**t **F**rottement)	
K : élasticité Z : viscosité	-
BUT (**BUT**tée)	
K : élasticité Z : viscosité S : seuil	-
LNL (**L**iaison **N**on **L**inéaire)	
LNLK : caractéristique Différence de position-Force LNLZ : caractéristique Différence de vitesse-Force	-
SOX (**SO**rtie **X** – position)	
-	-

Annexe 2. La Cellule TFP

1. Définition et algorithme

La Cellule Transducteur Force-Position (ou Cellule TFP), est une **Cellule*** dont les paramètres répondent à la condition suivante : M = K = Z. Elle peut être réalisée sous forme explicite (objet composé d'un module SOL et d'un module MAS reliés par un module REF) ou implicite (module CEL). Elle est nommée ainsi en raison du fait qu'elle a, à tout instant de la simulation, une position proportionnelle à la résultante des forces reçues à l'instant précédent : elle réalise donc une transduction entre une force et une position. Cette propriété très particulière fait d'elle un *objet remarquable* (cf. p. 180), qui est utilisable dans diverses situations et en particulier dans des composants de Métrologie.

Etant donné que la Cellule TFP est mobile, les forces auxquelles elle est soumise varient en fonction de sa position et de sa vitesse. Mais le plus souvent, on se ramène à une situation dans laquelle celles-ci sont négligeables par rapport aux positions et aux vitesses des modules qui lui sont liés, ce qui permet alors de considérer que les forces reçues ne dépendent que de ces dernières grandeurs. On peut alors envisager la Cellule comme un système à entrée-sortie, l'entrée étant la résultante des forces, et la sortie la position.

Démontrons la propriété que nous venons d'énoncer. Pour simplifier, nous considérons ici le module CEL, dont l'algorithme, donné ci-dessous est une optimisation des algorithmes combinés des modules SOL, REF et MAS de la Cellule sous forme explicite. Rappelons que dans ce cas, M désigne l'inertie du module MAS intégré, et K et Z respectivement les coefficients de raideur et de viscosité du module REF intégré. Par ailleurs, le module SOL a une position fixe $X_0 = 0$. Les variables de l'algorithme sont les suivantes :

- X(n) : position du module MAS de la Cellule à l'instant n. On dira, pour abréger, qu'il s'agit de la *position de la Cellule*.
- F(n) : résultante des forces appliquées au module MAS de la cellule à l'instant n.

L'algorithme du module CEL est :

$$X(n+1) = \left(2 - \frac{K+Z}{M}\right)X(n) + \left(\frac{Z}{M} - 1\right)X(n-1) + {}^{1}\!/_{M}\, F(n)$$

En introduisant l'égalité M = K = Z, il vient immédiatement :

$$X(n+1) = {}^{1}\!/_{M}\, F(n) \qquad (1)$$

Ainsi, la position de la Cellule à l'instant n+1 est bien proportionnelle à la résultante des forces soumises à l'instant n, le coefficient de proportionnalité étant l'inverse de M. En particulier, si la force s'annule à l'instant n, la Cellule retrouve sa position de repos $X_0 = 0$ dès l'instant n+1, en un seul « pas » de simulation. Cette propriété peut être utilisée, par exemple, pour réaliser des composants de détection dont la vitesse de réaction est quasi-instantanée.

2. Utilisation de la Cellule TFP pour la Métrologie

Comme nous l'avons vu dans la section du Chapitre 6 consacrée à la Métrologie (p. 208), la Cellule TFP peut être utilisée pour mesure une vitesse. Pour cela, on connecte le module dont on souhaite mesurer la vitesse ($\mathcal{M}_1$) à une Cellule TFP ($\mathcal{C}$) par l'intermédiaire d'un module FRO de très faible viscosité. Nous choisirons ici les paramètres suivants :

- Cellule TFP : M = K = Z = 1
- Module FRO : Z = 10^{-9}

On note V(n) la vitesse de $\mathcal{C}$ à l'instant n et $V_1(n)$ la vitesse de $\mathcal{M}_1$. La force appliquée par le module FRO sur $\mathcal{C}$ par le module FRO est :

$$F(n) = Z \cdot (V_1(n) - V(n))$$

Le coefficient Z est suffisamment petit par rapport à l'inertie de $\mathcal{C}$ pour qu'on puisse considérer que V(n) est négligeable devant $V_1(n)$. On a alors une expression approchée de la force :

$$F(n) \approx Z \cdot V_1(n)$$

En reportant dans l'équation (1), avec M = 1, on obtient l'expression approchée de la position de la Cellule :

$$X(n+1) \approx Z \cdot V_1(n) \qquad (2)$$

On voit que la position de $\mathcal{C}$ est, à tout instant, proportionnelle à la vitesse de $\mathcal{M}_1$ à l'instant précédent, avec un coefficient de proportionnalité égal à Z. Le composant CEL+FRO réalise donc une transduction entre la vitesse de $\mathcal{M}_1$ et la position X(n), ce qui permet de mesurer cette vitesse (avec un échantillon de retard) en comparant visuellement la position de $\mathcal{C}$ avec celle de composans étalons. Ceux-ci peuvent être réalisés en connectant N Cellules TFP à N modules MAS dont on connaît la vitesse, ou plus simplement en plaçant directement des modules MAS représentant les vitesses voulues, en calculant leur position grâce à l'équation (2).

3. Le Chevalet

Le Chevalet est un objet jouant, comme son nom l'indique, un rôle similaire à celui des chevalets des instruments à corde réels. Il s'agit d'une Cellule dont l'inertie est suffisamment élevée pour qu'elle puisse servir de point d'attache à une ou plusieurs structures, tout en étant assez « légère » pour être mise en mouvement par les oscillations de celles-ci. Cette propriété lui permet d'assurer un couplage entre plusieurs structures acoustiques primaires, ou entre des structures primaires et une structure acoustique secondaire (modélisant, par exemple, une table de résonance), phénomènes qu'on observe dans les instruments réels. De plus, il est possible de connecter un Chevalet à un module SOX afin de réaliser, par ce moyen, la captation simultanée de toutes les structures auxquelles il sert de point d'attache. En effet, le Chevalet, comme tous les modules <MAT> réagit en fonction de la résultante des forces qui lui sont appliquées, ses mouvements sont donc étroitement liés à celle-ci.

Plusieurs types de Cellules ont été utilisés pour réaliser un Chevalet, leurs caractéristiques communes étant d'une part leur inertie, qui est environ 100 fois supérieure à celle des modules <MAT> qui lui sont reliés, et d'autre part les valeurs élevées de leurs paramètres K et Z, comprises entre M et M/10. En effet, un chevalet réel est un objet rigide bien que déformable, ce qu'on modélise par une valeur élevée

de K, et très amorti (ses oscillations s'arrêtent en effet aussi tôt qu'on a interrompu celles des cordes qui lui sont reliées), d'où la valeur élevée de Z.

Bien évidemment, le comportement du Chevalet change selon les paramètres M, K et Z. Les caractéristiques de différentes configurations ont été analysées avec précision [Couroussé 2003]. Il a été montré, en particulier, qu'un Chevalet ayant les paramètres M = 100, K = 25 et Z = 75 (pour une structure acoustique dont les modules MAS ont une inertie de 1) se comporte comme un filtre passe-haut si l'on considère la force qui lui est appliquée comme le signal d'entrée et sa position comme le signal de sorte, tandis qu'un Chevalet constitué d'une Cellule TFP n'induit aucun filtrage, mais seulement un déphasage (auquel notre oreille n'est, en général, pas sensible).

Actuellement, c'est donc majoritairement la Cellule TFP qu'on utilise comme Chevalet lorsqu'on destine celui-ci à la Captation, car l'absence de filtrage permet une écoute neutre. On prend en général $M = 100 \cdot M_{Max}$, où M_{Max} est la plus grande inertie des modules <MAT> des structures attachées au Chevalet. Une valeur plus élevée de M le rend moins sensible aux forces qui lui sont appliquées, il ne peut alors plus assurer de couplage entre des structures car ses mouvements ont une amplitude trop faible. En revanche, une valeur plus petite (de l'ordre de $10 \cdot M_{Max}$) est insuffisante pour que le Chevalet se comporte comme un point d'attache pour les structures, qui voient dans ce cas leurs propriétés modifiées par rapport au cas où le Chevalet serait remplacé par un module SOL.

Notons que la situation où la force appliquée au Chevalet est considérée comme un signal d'entrée est une approximation, puisque le Chevalet est mobile ; elle serait exacte s'il était fixe. Cette approximation est néanmoins correcte, car les mouvements du Chevalet ont généralement une amplitude beaucoup plus faible que celle des structures acoustiques qui lui sont attachées, en raison du fait que tous ses paramètres physiques sont, d'après ce que nous venons de dire, d'un ordre de grandeur supérieur à ceux de ces structures.

Annexe 3. Generation of Complex Sound Sequences using Physical Models with Dynamical Structures

L'article qui suit a été accepté en présentation orale lors de l'édition 2006 de l'International Computer Music Conference, organisée par le Tulane University Music Department, à la Nouvelle-Orléans (Etats-Unis).

Il présente deux versions d'un composant utilisé pour réaliser une Modification structurelle dynamique. La version simple (*simple sticking device*) est la combinaison d'une Liaison piège (cf. Chapitre 6, p. 206) et de deux modules BUT assurant la stabilité de l'interaction temporaire, tandis que la version complète (*complete sticking device*) est une généralisation de la première permettant de supprimer la contrainte portant sur la position relative des modules à « coller ».

Deux exemples d'applications de ces composants sont ensuite introduits :

- Transformation d'un Chapelet ouvert en une structure en anneau (modèle (St)ring).
- Modèle de cordes reconfigurables.

Le deuxième modèle a la particularité de produire des séquences complexes de sons de différentes hauteurs, dues aux différentes interactions entre les segments de cordes (collages, ruptures, excitations mutuelles). L'article insiste sur les possibilités de contrôle de ces séquences dans un contexte de création musicale.

Generation of Complex Sound Sequences using Physical Models with Dynamical Structures

Olivier Tache[*], Claude Cadoz[*†]

[*]ICA Laboratory, INPG, Grenoble, France
olivier.tache@imag.fr
[†]ACROE, INPG, Grenoble, France
claude.cadoz@imag.fr

Abstract

Mass-interaction physical modeling is one of the few formalisms that can unify the work on music composition and sound synthesis. It allows generating sound sequences that exhibit, for example, some of the qualities of instrumental performance. This article introduces a method for building mass-interaction models whose physical structure changes during the simulation. Structural evolution is implemented in a physically consistent manner, by using nonlinear interactions that set temporary viscoelastic links between simulated objects. We present in details a model built with this method. It produces a wide range of complex sound sequences, the user having a control over global aspects of its behavior. This example shows that evolving models are particularly useful for the generation of macrotemporal musical forms.

1 Introduction

Since the beginnings of computer music, sound synthesis and computer-assisted composition have followed quite different paths. The majority of computer environments for music creation introduce a separation between sound synthesis (generation of microstructure) and sonic events organization (generation of macrostructure). The high number of musical works performed with these tools attests their relevance to musical creation. However, the persistent distinction between those two levels in computer music may somehow have slowed down the development of more general tools and concepts (Berg 1996). Indeed, this separation involves that micro- and macrostructure are viewed as belonging to different spaces. This conception is inherited from acoustical music, where it is not an issue, since the instrumentalist is "in charge of" the interaction between musical ideas and sound production mechanisms. In computer music, the interpretation is either performed in real-time, using specific interfaces (e.g. gesture devices), or is "simulated" (and possibly extended) by algorithmic processes. In this case, a formalism including both micro- and macro-level may be a powerful and usable tool for designing complex relationships between them.

A few environment and languages attempting to unify the micro- and the macro-level have been proposed (Dannenberg 1997; Laurson, Norilo, and Kuuskankare, 2003). GENESIS (Castagné, Cadoz 2002) is such an environment. It is based on the CORDIS-ANIMA mass-interaction physical modeling system (Cadoz, Luciani, and Florens 1993). Cadoz (2002) demonstrated that mass-interaction physical modeling allows composing entire musical pieces. For example, *pico..TERA* (Cadoz, C., 2002) is a piece entirely generated by a single model, without any post-processing. In GENESIS, musical models deal with the two levels of musical creation. They are composed of several components with different temporal scales. Composing with GENESIS consists in designing components, such as virtual instrumentalists, which generate sonic events by interacting with virtual instruments, at the temporal scale of gesture. The musician interested in computer-assisted composition is then able to build his or her own event generators.

Due to the fundamentally modular nature of CORDIS-ANIMA, there are a very large number of possible GENESIS models. It is thus important to explore this potentiality space. We are currently identifying and documenting the main categories of sounding and compositional models. The purpose of the study reported here was to extend the set of available event generation schemes for computer-assisted composition. We present a physically consistent method for building GENESIS models whose structure changes during the simulation. Structural evolution is performed in a discrete way, by temporarily linking two objects. These models are used to produce sound sequences that exhibit complex timbre and timing variations.

After an introduction to CORDIS-ANIMA and GENESIS (Section 2), we will present the method of structural evolution (Section 3) and give a detailed presentation of a reconfigurable string "instrument", (Section 4). We will focus on the control it offers to the musician. This model demonstrates a possible musical application of structural evolution, which deals with the relationship between repetition and irregularity.

2 The GENESIS environment

2.1 Overview of the CORDIS-ANIMA system

The GENESIS environment is based on a mass-interaction modeling and simulation system called

CORDIS-ANIMA. This system has been extensively described by Cadoz, Luciani and Florens (1993), so we only give here an overview of its principles.

In CORDIS-ANIMA, virtual objects are composed of two types of elements, called *modules*:

- Punctual material elements or <MAT> modules. The most used is the MAS module, which represents an ideal inertia.
- Link elements or <LIA> modules. A <LIA> simulates an interaction between two <MAT>. The different available interactions are based on linear or nonlinear elasticity and friction.

A <LIA> computes forces according to the relative distance or velocity of the two <MAT> it links. A <MAT> computes its position according to the forces it receives from the <LIA> modules it is linked with. Position and force are the two fundamental variables upon which CORDIS-ANIMA modules operate. CORDIS-ANIMA models are networks of interconnected <MAT> and <LIA> modules.

All <MAT> modules have an initial position. Mobile <MAT> modules also have an inertia parameter (M) and an initial velocity. <LIA> modules have elasticity (K) and/or friction (Z) parameters

2.2 From CORDIS-ANIMA to GENESIS

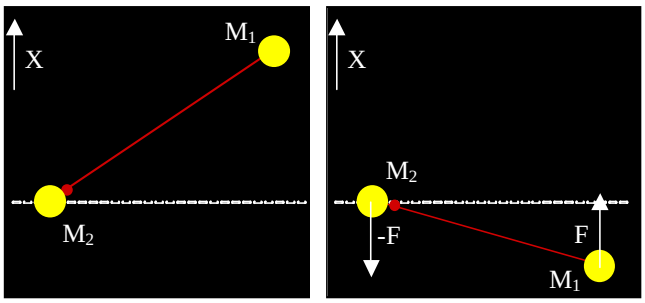
GENESIS (Castagné, Cadoz 2002) is a graphical environment for musical creation based on CORDIS-ANIMA. Its interface lets the user operate at an elementary level, since models are created by direct graphical manipulation and connection of individual modules on a virtual workbench. A number of higher-level tools are available for fast parameter edition and generation of large structures, such as strings and membranes.

GENESIS implements ten CORDIS-ANIMA modules listed below. While CORDIS-ANIMA does not specify the dimensionality of its modules, the simulation space is one-dimensional in GENESIS. Consequently, modules only move in the direction that is perpendicular to the workbench and positions and velocities are computed along this axis. For convenience, graphical manipulations take place in a 2D space (the Workbench), but the position of the modules in this plane have absolutely no consequence on the simulation.

The GENESIS modules. The set of GENESIS' building blocks is composed of:

- Linear modules: ideal mass (MAS), fixed point (SOL), second-order damped oscillator (CEL), elasticity (RES), friction (FRO), elasticity and friction combined (REF);
- Nonlinear interactions: the BUT and the LNL;
- Force or position input (ENF, ENX) and output (SOF, SOX) modules.

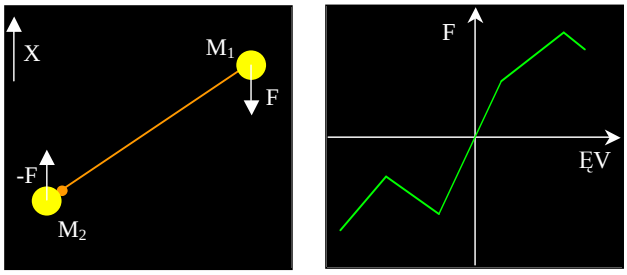
The BUT module. The BUT module simulates a conditional viscoelastic interaction between two modules (Figure 1). When the difference between the positions of M_1 and M_2 is greater than a given threshold S, there is no interaction between them; when the difference is smaller than the threshold, the BUT simulates the effect of a null-length damped spring between M_1 and M_2. The BUT is an asymmetric module, since the value that is compared to the threshold is not the *distance* between the two modules, but the difference of their positions. The graphical representation of a BUT module includes a small dot indicating its orientation.



(a) (b)

Figure 1. Effect of the BUT interaction with a null threshold. (a) M_1 is above the threshold; modules are free. (b) M_2 is below the threshold; modules are linked by a viscoelastic interaction

The LNL module. The LNL module is a user-defined nonlinear viscoelastic interaction. The user chooses the points defining two curves (Figure 2). The first one (LNLK) gives the force to be applied to the modules according to the difference of their positions (nonlinear elasticity). The second one (LNLZ) gives the force according to the difference of their velocities (nonlinear friction). Elastic and friction forces are added and applied to the <MAT> modules linked by the LNL.



(a) (b)

Figure 2. The LNL module. (a) Graphical representation. (b) A velocity-force curve (LNLZ)

2.3 The GENESIS Instrumentarium

We are currently working on the development of a large library of GENESIS models that will cover the major possibilities of the environment so far, concerning sound synthesis and processing as well as sonic events generation. This library, the *Instrumentarium*, is not a mere collection of models. It will also include a detailed description of each selected model or category of models and will be integrated into a precise and complete documentation of practical and conceptual aspects of GENESIS. This information will be available with the next multiplatform release of the environment and, hopefully, will help learners build a deep knowledge of physical modeling and GENESIS. It aims at

meeting the same kind of needs as the *Csound Book* (Boulanger 1999) does for learners of this other highly modular environment.

Constructing the Instrumentarium. The study we present here was conducted with the aim of developing the Instrumentarium, thus it is important to understand our general approach to this task.

Generally speaking, we do not try to *imitate* real-world instruments or phenomena, even though – as for any synthesis technique – this is a useful exercise for developing experience. We consider that the conceptual basis of CORDIS-ANIMA is sufficient to ensure that most GENESIS models will show physically plausible behavior, thus producing correspondingly plausible sounds or sound sequences. The rare cases where this statement may not be true are rigorously studied. Consequently, we build and study GENESIS models for themselves, while keeping real-world phenomena as references in the modeling process.

The building of the Instrumentarium consists in a large number of precise studies like the one reported here. Each study involves several steps. Firstly, the direction to be explored is defined according to various goals. Then begins a phase during which a number of models are built and evaluated against the initial objectives. An important guideline is the search for minimal models that exhibit interesting properties. Indeed, minimal models constitute a far better teaching support than complex ones. They are easier to understand and more usable. The last step is the precise analysis of selected models. It aims at providing rules that will help users employ models in creative situations. When possible, these rules are implemented in Excel-like calc sheets in order to provide fast calculation of common formulas.

The method and models presented in Sections 3 and 4 result from a systematic exploration of the applications of GENESIS' nonlinear interactions, with the aim of building models that behave as if their parameters or structure were evolving during the simulation.[1] The work on parametric changes led to models similar to the nonlinear strings presented by Castagné and Cadoz (2000), with the extra possibility to perform timbre morphing by amplifying nonlinear effects. We only present here the results concerning structural changes, which had not been previously studied and which extend the range of event generation mechanisms available in mass-interaction physical modeling.

3 Setting up temporary interactions between virtual objects

This section describes a method used to dynamically modify the structure of a GENESIS model. The basic idea is to set temporary viscoelastic interactions between MAS modules belonging to two different objects, thus resulting in a new object. The group of modules used to set up a temporary interaction is called a *sticking device* (Figure 3). Sticking devices are based on GENESIS nonlinear interactions. We designed two different devices, the simpler one (Section 3.1) being a component of the other (Section 3.2).

Two important aspects of these devices were evaluated: their "transparency" and the strength of the temporary link they create. Transparency refers to the importance of side effects introduced by the device compared to reference models where temporary interactions are replaced by equivalent permanent ones.

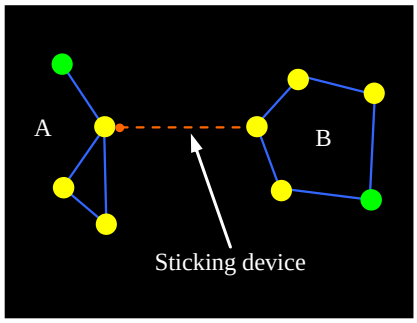
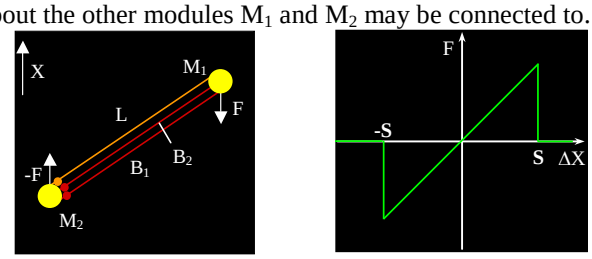


Figure 3. Temporary link between two simple structures. Objects A and B are "stuck" together with nonlinear interactions.

3.1 The simple sticking device

This device is composed of an elastic-only LNL module (L) and two viscous-only BUT modules (B_1 and B_2). It links two <MAT> modules, M_1 and M_2, which are supposed to be of the same inertia, m (Figure 4-a). We make no supposition about the other modules M_1 and M_2 may be connected to.



(a) (b)

Figure 4. The simple sticking device. (a) The three <LIA> modules. (b) The LNLK curve of module L.

L is a symmetric elastic interaction with a threshold, S. Its LNLK curve is shown in Figure 4-b. The central part of the curve corresponds to an ideal spring of stiffness K_L. This spring is only active when the distance between M_1 and M_2, ΔX, is smaller than S.

B_1 and B_2 prevent M_1 and M_2 from mutually oscillating when the spring is active. This increases the strength of the temporary link, and, in particular, avoids that the link breaks as soon as it is set. B_1 and B_2 have opposite threshold and friction coefficient. Their combination produces a symmetric friction zone around M_2, as shown in Figure 5. The friction coefficient of B_1 is calculated according to K_L and m:

$$Z_1 = 2\sqrt{K_L m} - K_L \quad (1)$$

This value is the critical viscosity of a GENESIS second order oscillator of inertia m and stiffness K_L.

[1] Indeed, in GENESIS, parameters and connections between modules (i.e. structure) are chosen at design time and remain the same during the simulation of the model.

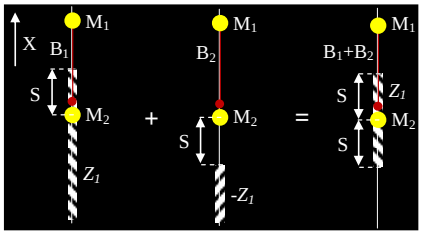


Figure 5. The combined effect of B1 and B2. Friction zones are represented by hatchings

The general effect of the simple sticking device is the following. If ΔX is smaller than S, the MAT modules are mutually attracted. They tend to occupy the same position without oscillating, thanks to B_1 and B_2. One can say they are "stuck" together. If ΔX is greater than S, the MAT modules do not interact.

Physical consistency. While the simple sticking device is unrealizable in the real world, it is still physically consistent. Indeed, it only uses elementary GENESIS modules, which all fundamentally respect a discrete equivalent of Newton's laws. One may notice that, when the interaction is set, M_1 and M_2 are accelerated and gain kinetic energy, since they are now attached via an elongated spring. However, this energy is not created *ex nihilo*. It is present as potential energy before the interaction is set and it returns to this state when the link is broken. This phenomenon is controllable: decreasing S reduces the excitation produced by the sticking, though this results in a weaker link.

Evaluation. This sticking device is not perfect. Firstly, forces applied to M_1 and M_2 by other modules may easily cause ΔX to become greater than S, thus breaking the interaction. Secondly, M_1 and M_2 cannot be at the same position without interacting. This constraint reduces the range of possible applications. Moreover, it would be useful to be able to set *any* interaction between M_1 and M_2, while we are so far limited to critically damped viscoelasticity.

An important side effect of the sticking device is the damping introduced by B_1. It may have significant consequences on the vibrating properties of the object created by the linking of M_1 and M_2. Its higher modes are likely to have shorter damping times than higher modes of an equivalent static model (i.e. a model in which the sticking device has been replaced by a linear spring of stiffness K_L). In order to reduce this effect, it is possible to choose a lower value for Z_1. This will also decrease the strength of the temporary link, so the actual choice of Z_1 depends on the particular needs of the application.

3.2 The complete sticking device

In order to get a general method of temporarily linking masses, we built a more complex sticking device represented in Figure 6.

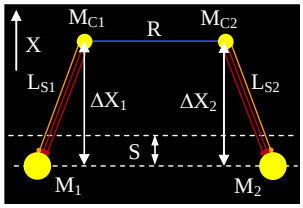


Figure 6. The general sticking device applied to MAS modules M_1 and M_2.

Description. The device is made of two "intermediary" MAS modules M_{C1} and M_{C2}, with the same inertia m_C. They are respectively linked to M_1 and M_2 with identical simple sticking devices (L_{S1} and L_{S2}), and linked together by an interaction R. R is the interaction we want to set between M_1 and M_2. It can be any GENESIS interaction, provided that it does not cause instability.[2] We will suppose here that it is a linear viscoelastic interaction.

L_{S1} and L_{S2} are very stiff, so M_{Ci} closely follows M_i when they are connected. Thus, as a first approximation, we may consider a connected M_i-M_{Ci} pair as a single MAT module having inertia equal to the sum of the inertias of M_i and M_{Ci}. m_C can be relatively small (a tenth or a hundredth of m) so as to reduce the amount of inertia added to the system.

When ΔX_1 and ΔX_2 are both smaller than S, the M_i-M_{Ci} pairs are connected (Figure 7). Consequently, we can state that the whole system is equivalent to a system composed of two MAT modules M'_1 and M'_2 linked by R, with M'_1 and M'_2 inertia equal to $m+m_C$. In other words, a temporary interaction has been set between M_1 and M_2, at the expense of an increase in inertia and damping.

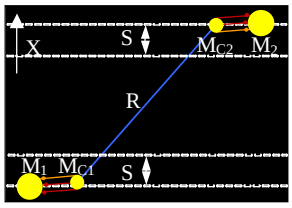


Figure 7. The complete sticking device with the interaction active.

Breaking the interaction. The interaction "breaks" if the distance between M_1 and M_2 becomes greater than a certain threshold S_B that is easily calculated:

$$S_B = S\frac{K_L + 2K_R}{K_R} \qquad (2)$$

where K_L is the stiffness of L_{S1} and L_{S2}. We see that S_B is at least two times greater than S, so the link is clearly stronger than the one created by the simple sticking device alone.

There is an interesting way to deliberately break the temporary link at a chosen time. It consists in striking M_{C1} and M_{C2} with a very high velocity MAS, so that they get out of the threshold in only *one* simulation step (Figure 8). In this case, the interaction is instantly interrupted, so the sudden movement of M_{C1} and M_{C2} does not influence M_1

[2] In the GENESIS unit system, which is different from the real-world one, this means that the numerical value of its stiffness should not be greater than m_C.

and M_2. Thanks to quantization, it is possible to break objects without making any noise!

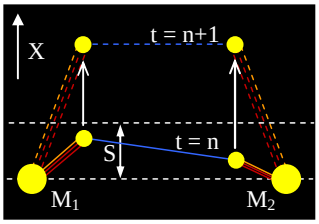


Figure 8. Breaking a temporary interaction without making noise. M_{C1} and M_{C2} get out of the threshold in one simulation step.

Comparison with the simple sticking device. The complete sticking device solves the main drawbacks of the simple one. It can set any interaction between two MAS modules, while the link is significantly stronger. Moreover, the position of M_1 and M_2 are not constrained anymore; the masses may be at the same position without interacting. On the other hand, the complete device is made of two simple devices, which means that the extra damping is twice as high as in the simple case.

3.3 A sample application: the (St)ring

This model demonstrates a possible application of the general sticking device. It simulates an open string (i.e. a string whose only one endpoint is fixed) that gets longer in two steps, and then turns into a ring, as its endpoints are finally connected one to the other (Figure 9).

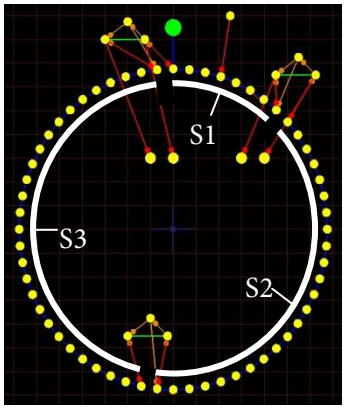


Figure 9. A three-segment (St)ring

The first string segment (S1) is struck at the beginning of the simulation. Then, one after the other, three sticking devices connect S1 to S2, S2 to S3 and S3 to S1. The intermediary masses of the sticking devices are initially at rest. They are linked to the string segments via a unidirectional friction that progressively accelerates them until they connect. The acceleration of a given sticking device is proportional to the amplitude of the oscillations of the segment it is linked to.

Each time a segment is added to the previous one, the number of modes increases by the number of MAS modules that are added[3] and the fundamental frequency decreases because the vibrating structure gets longer (Figure 10). When S3 connects to S1, the topology of the object changes. This evolution is clearly perceptible in the sound produced by the model, since the timbre, which is pseudo-harmonic before the connection, abruptly becomes inharmonic (see the last part of the spectrogram).

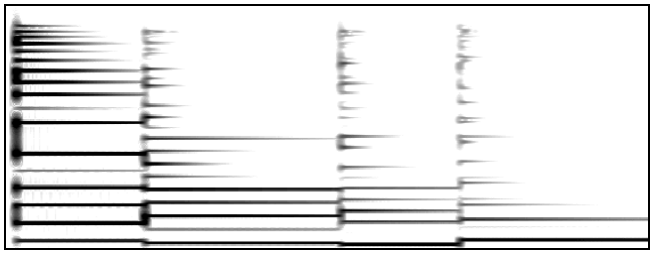


Figure 10. Spectrograms of the first 4 seconds of sounds produced by the (St)ring. *Linear frequency scale, max. frequency: 2200 Hz.*

In order to evaluate the effects of the sticking devices, we compared the sound produced by a completely connected (St)ring to the sound of a an equivalent linear ring.[4] While the frequency of partials is nearly identical in both sounds, their decay time is much shorter in the nonlinear model. After 4 seconds, only two partials are still audible in the first sound, while there are five in the second sound. This demonstrates that critical damping plays an important role in vibrating properties of the connected model. M_i-M_{Ci} pairs are not simply equivalent to a single MAS module as was first approximated.

At the perceptual level, both sounds are identified as being produced by metallic objects, but the second one may be perceived as being unnaturally sustained. Although the extra damping introduced by the sticking device may not always be desirable, it doesn't affect sound plausibility.

4 A generative model: the reconfigurable string instrument

This model demonstrates a more musically significant application of structural evolution than the (St)ring. It uses the simple sticking device. Since its interest resides in the frequent ruptures of the temporary links, their strength is not a concern here. Consequently, the BUT modules that usually stabilize the links are not used.

4.1 Description

The reconfigurable string instrument is made of two groups of three open strings. The free endpoint of each string is linked to all the free endpoints of the other group's strings with simple sticking devices (Figure 11). When two endpoints are close, they are temporarily linked, thus creating a closed string. The entire right group has a

[3] The number of vibrating modes of a linear GENESIS model is equal to the number of its MAS modules.

[4] In the linear model, each M_i-M_{Ci} pair is replaced by a single MAS module with an inertia equal to $m+m_C$

sinusoidal movement caused by a very heavy oscillator that carries the "bridges". As a result, the connections between strings keep setting up and breaking throughout the simulation (Figure 12).

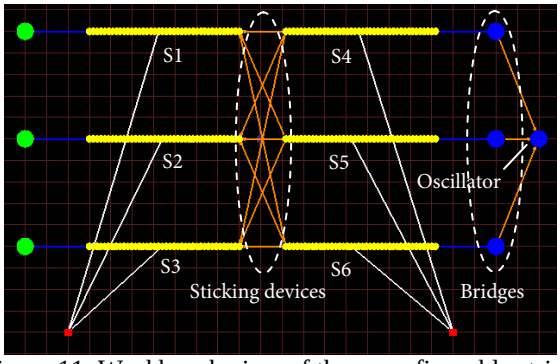
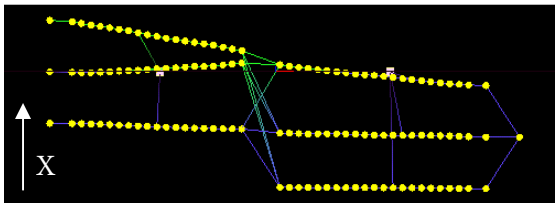
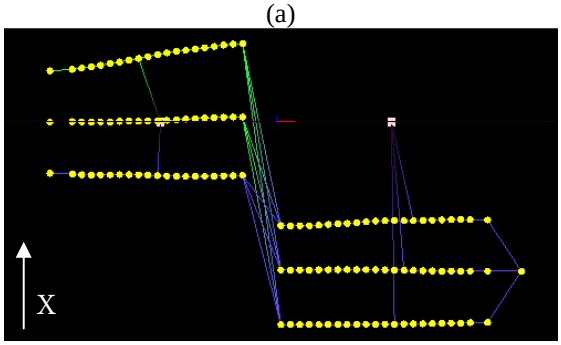


Figure 11. Workbench view of the reconfigurable string instrument.



(a)



(b)

Figure 12. Two consecutive states of the reconfigurable string instrument. (a) S1 and S2 are linked with S4, S3 with S5 and S6 is free. (b) The right group is below the left one; all strings are free

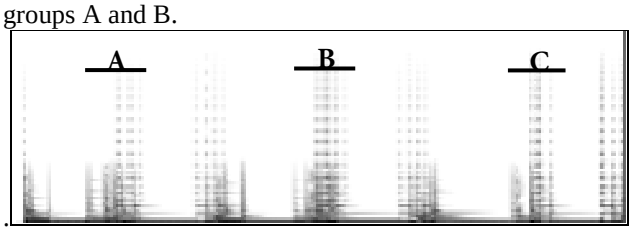
4.2 Sound sequences generation

A string is excited when it connects to or disconnects from another string. The excitation produces a hearable sonic event, characterized by a change in pitch and timbre, as the vibrating structures are modified Consequently, the reconfigurable string instrument generates sequences of sounds.

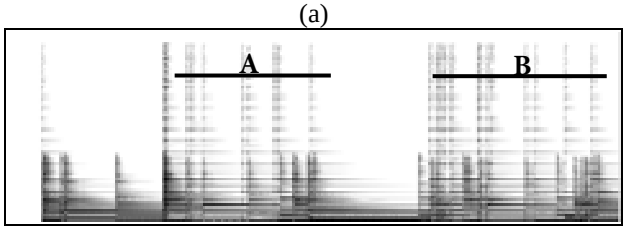
The strings can be precisely tuned in order to choose the timbre and pitch classes produced by the model. For example, it may be interesting to have a similar string in each group so that harmonic sounds are produced when both are connected. Other strings could be added in order to have richer possibilities.

Sound sequences produced by the model are complex and partially chaotic (Figure 13), since the generation of events depends on the unpredictable movements of the strings' endpoints. However, the regular movement of the oscillator imposes periodicity to the global behavior of the model.

The oscillator of the model that generated the first sound (Figure 13-a) had a period of 8 seconds. The effect of this regular oscillation can be seen in the spectrogram. It shows several groups of sonic events approximately every 4 seconds (the half-period), with a strong similarity between the groups separated by 8 seconds (e.g. A, B and C). The second sound (Figure 13-b) was produced by a different version of the model with a period of 11 seconds. Two sound groups (A and B) are clearly visible in the spectrogram. They have a very similar structure. In both cases, events groups are not exactly of the same duration. For example, in the first sound, group C is shorter than groups A and B.



(a)



(b)

Figure 13. First 24 s of the sound produced by two versions of the reconfigurable strings. (a) 8 s period, high damping. (b) 11 s period, medium damping. *Linear frequency scale, max. frequency: 5000 Hz.*

Generally speaking, the sound sequences generated by the reconfigurable string instrument are characterized by a periodic macrotemporal form, while the precise organization of sonic events is irregular.

4.3 Controlling the model

Working with the reconfigurable string model implies dealing with unpredictability, but the musician can still control certain aspects of its behavior. Available controls allow exploring the possibilities of the model in a structured way.

Several parameters of the model may influence the same phenomenon. Thus, it is recommended to choose the properties of the strings in a first stage, and then to deal only with the other parameters. They are the following:

- Frequency (F) and amplitude (A) of the oscillator's movement.
- Distance between the fixed endpoints of the strings (D).
- Threshold (S) and stiffness (K_L) of the sticking devices.

We suppose here that the values of D, K_L and S are the same across the model.

Influence of the oscillator's parameters. The frequency of the oscillator has a quite simple influence on the model's behavior. It determines its general periodicity, thus fixing the interval between similar sound groups. The influence of amplitude is more complex. Generally speaking, A controls the number of possible string configurations, i.e. the diversity of individual sounds that the model produces. If it is relatively small, each string only interacts with the opposite one (e.g. S1 with S4). If it is high enough, each string interacts with all the strings of the opposite group. For higher values of A, the model is periodically found in the configuration depicted in Figure 12-b, where no sonic event is produced. This results in periodic rests, whose duration increases with A

Influence of the sticking device's parameters. K and S play approximately the same role. Since they determine the strength of the temporary links, they directly influence the complexity and the predictability of the sound sequence. A stronger link results in a smaller number of sonic events, so the higher K and/or S, the simpler the sequence. In addition, when K or S are particularly small, the link is so weak that it never lasts more than a few milliseconds. In this case, the interaction between two strings is similar to a kind of mutual plucking. A stiff string, whose endpoints have fast movements, may pluck another one at a fast rate. This produces sound textures rather than distinct sonic events. The duration of these sound textures depends on the characteristics of the oscillator. They are longer if F and/or A are small.

Influence of the distance between the strings. This parameter is rather difficult to use, since it influences both the diversity and the complexity of the sound sequences produced. Indeed, high values of D have the same effect as low values of A (i.e. strings can't interact with all the strings of the opposite group). In addition, links between strings of different rows breaks easily, since the strings are more elongated than for smaller values of D.

5 Discussion

The reconfigurable string instrument allows the musician to deal with the relationship between repetition and irregularity, which may be considered one of the bases of musical composition. Furthermore, the interaction between the micro- and the macrostructure of the output sound sequences is really intimate here, since the same object performs event generation and sound production.[5] The reconfigurable strings model is a kind of partially programmable musical automaton. It generates varied, surprising and, in our opinion, musically meaningful sound sequences.

While the method of structural evolution allows working on sound synthesis alone (e.g. for producing continuous timbre change), its main interest is the articulation between micro- and macrostructure. The evolution of the structure of a model can be correlated by several means to the actions of the virtual instrumentalist. This is illustrated by the (St)ring, which lengthens more quickly if more energy is brought to the vibrating structure. Though this may be a rather dumb example, it suggests new ways of thinking the relationships between the micro- and the macrostructure of music generated by mass-interaction physical modeling.

[5] Indeed, it is impossible in this model to separate the exciter from the vibrating structure, as can be done for GENESIS compositional models that have been proposed so far.

6 Conclusion and future works

GENESIS compositional models that had been presented so far were composed of several static components, at least the virtual instrumentalist and its instrument. The method that we introduced in this article allows transforming these structures during the simulation. This brings more complex and potentially more expressive relations between the micro- and the macrostructure of the sound sequences generated. The movements of the low-frequency components of the models (e.g. the heavy oscillator of the reconfigurable strings) may modify the properties, not to say the *nature*, of the high-frequency components. This is a new possibility in physical modeling.

A model such as the reconfigurable string instrument is quite difficult to master, since some parameters have mutual influence. We will continue its study and add its results to the Instrumentarium, so that users will be informed of its possibilities and of the controls it offers. We also plan to extend the model by using more sophisticated vibrating structures than simple strings and by replacing the global oscillator by objects with more interesting behaviors. In addition, we will investigate the numerous other applications of both sticking devices, with the aim of designing new event generators and new evolutive sounding structures. Some of these models will be used for the creation of a complete musical work using GENESIS.

Acknowledgments

This work has been supported by the French Ministry for Culture and Communication and the French Ministry for Higher Education and Research.

References

Berg, P. 1996. Abstracting the Future: The Search for Musical Constructs. *Computer Music Journal* 20(3), 24–27.

Boulanger, R. 1999. *The CSound Book*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.

Cadoz, C., A. Luciani and J.L. Florens. 1993. CORDIS-ANIMA: A Modeling and Simulation System for Sound and Image Synthesis – The General Formalism. *Computer Music Journal* 17(1), 19–29.

Cadoz, C. 2002. The Physical Model as Metaphor for Musical Creation "pico..TERA", a piece entirely generated by physical model. *Proceedings of the 2002 International Computer Music Conference*, pp 305–312. San Francisco: International Computer Music Association.

Castagné, N., and C. Cadoz. 2000. Physical Modeling Synthesis: Balance Between Realism and Computing Speed. *Proceedings of the DAFX-00 Conference*, Verona, Italy, 2000.

Castagné, N. and C. Cadoz. 2002. GENESIS: A Friendly Musician-Oriented Environment for Mass-Interaction Physical Modeling. *Proceedings of the 2002 International Computer*

Music Conference. San Francisco: International Computer Music Association.
Dannenberg, R. B. 1997. Machine Tongues XIX: Nyquist, a Language for Composition and Sound Synthesis. *Computer Music Journal* 21(3), 50–60.
Laurson, M., V. Norilo and M. Kuuskankare. 2003. PWGLSynth: A Visual Synthesis Language for Virtual Instrument Design and Control. *Computer Music Journal* 29(3), 29–41.

Annexe 4. Exemples d'études de modèles complets

Cette Annexe est consacrée à l'étude de trois modèles particuliers à l'aide des outils mis en place tout au long de cette thèse. Elle participe à la validation de nos travaux, puisque les concepts que nous avons proposés permettent, comme nous allons le voir, de réaliser une description dénuée d'ambigüité de l'organisation de ces modèles, dont chacun présente des particularités qui le rendent difficilement analysable avec les approches systématiques proposées précédemment. Pour chaque modèle, nous réalisons une analyse fonctionnelle, nous identifions les différents niveaux hiérarchiques et nous décrivons de façon simple le résultat sonore de la simulation.

Le premier modèle été choisi en raison de la saillance des sons qu'il engendre (qui évoquent très fortement le son des maracas, d'où son nom) par rapport à de nombreux autres modèles semblables. Nous avons cherché à comprendre les facteurs expliquant la production de sons si particuliers, en réalisant une étude relativement approfondie (dont nous ne donnons ici qu'un aperçu) du rôle de ses paramètres.

Les deux autres modèles ont été utilisés pour la réalisation de la pièce *Utsikten* (Olivier Tache, 2007) créée en novembre 2007 à Grenoble, lors de l'évènement Enactive/07 …. Enaction_*in*_Arts. Ils ont recourt à des fonctions variées et, pour certaines, peu courantes, comme l'Etouffement, l'Excitation par viscosité négative, la Modification par Perturbation élastique et la Modification structurelle dynamique. Notons que seule la première de ces fonctions était prise en compte par la hiérarchisation Brutel et la grammaire Toussaint.

Ces modèles représentent ainsi à eux seuls un grand nombre de fonctions, de composants et de techniques de modélisation différents. Cette diversité nous apparaît comme suffisante pour commencer à valider la cohérence de la formalisation conceptuelle de l'Instrumentarium GENESIS que nous proposons dans cette thèse.

1. Le « Super Maracas »

Le modèle « Super Maracas » est particulièrement intéressant en raison de son timbre très « vivant », qui rappelle immanquablement celui des maracas réels. Il a retenu notre attention lors de la réalisation de l'inventaire GENESIS car cette propriété remarquable contraste avec sa structure relativement classique (Figure 77).

Il s'agit d'un cas typique où les valeurs des paramètres jouent un rôle très important dans la qualité du son final. Une étude de ceux-ci a donc été nécessaire pour expliquer le timbre si caractéristique de ce modèle.

Commençons par décrire plus précisément le modèle. On remarque en premier lieu qu'il a une structure quasi-symétrique. Il est composé de deux structures acoustiques maracassées (S1 et S2), dont chaque module MAS (d'inertie M=1) est lié à un Chevalet par un module REF. La Captation est effectuée sur chaque Chevalet par l'intermédiaire d'une Oreille. L'Excitation est réalisée par 6 Percuteurs (Pi) d'inertie particulièrement élevée (M=100), liés à certains modules MAS des structures acoustiques ; chaque Percuteur partage son module MAS avec un autre (par exemple P1 et P4).

Les liaisons BUT des Percuteurs sont configurées de façon à ce que le module $\mathcal{M}i$ percute la structure S1 lorsqu'il arrive à son niveau et la structure S2 lorsqu'il s'éloigne d'elle de plus de 0,25 m. A chaque percussion, $\mathcal{M}i$ est renvoyé en sens contraire : il percute donc tour à tour S1 et S2 tant qu'il lui reste de

l'énergie, produisant ainsi une séquence de sons. La séquence produite par l'ensemble des Percuteurs est relativement irrégulière en raison du fait qu'ils n'ont pas tous la même vitesse initiale et que chaque collision est susceptible de faire perdre plus ou moins d'énergie aux modules $\mathcal{M}_i$ selon les circonstances exactes dans lesquelles elle a lieu.

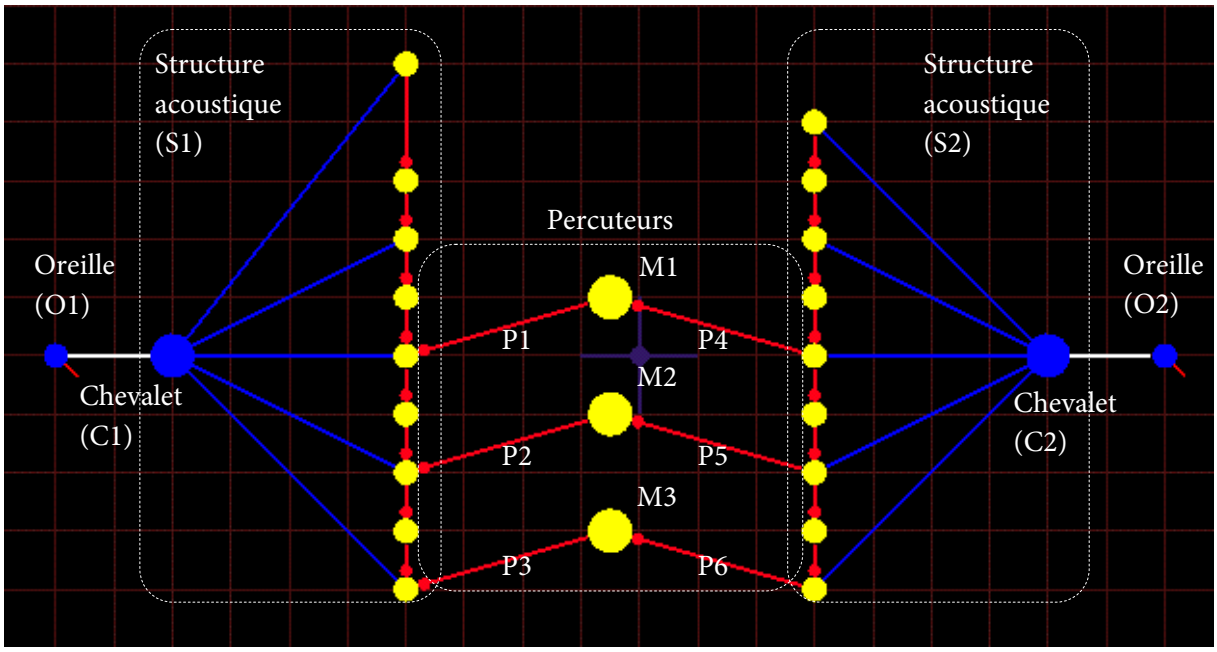


Figure 77 : Le « Super Maracas » sur l'Etabli GENESIS

Ce modèle comporte 3 niveaux hiérarchiques : celui des Percuteurs (qui ont une inertie 100 fois plus grande que celle des structures acoustiques), celui des deux structures acoustiques et celui des Oreilles. En ce qui concerne la relation entre les Percuteurs et les structures acoustiques, il ne s'agit évidemment pas d'une hiérarchisation absolue, puisque les modules $\mathcal{M}_i$ rebondissent contre ces dernières : il y a donc une nette rétroaction des structures de niveau inférieur sur celles de niveau supérieur.

Le graphe fonctionnel du modèle est donné dans la Figure 78.

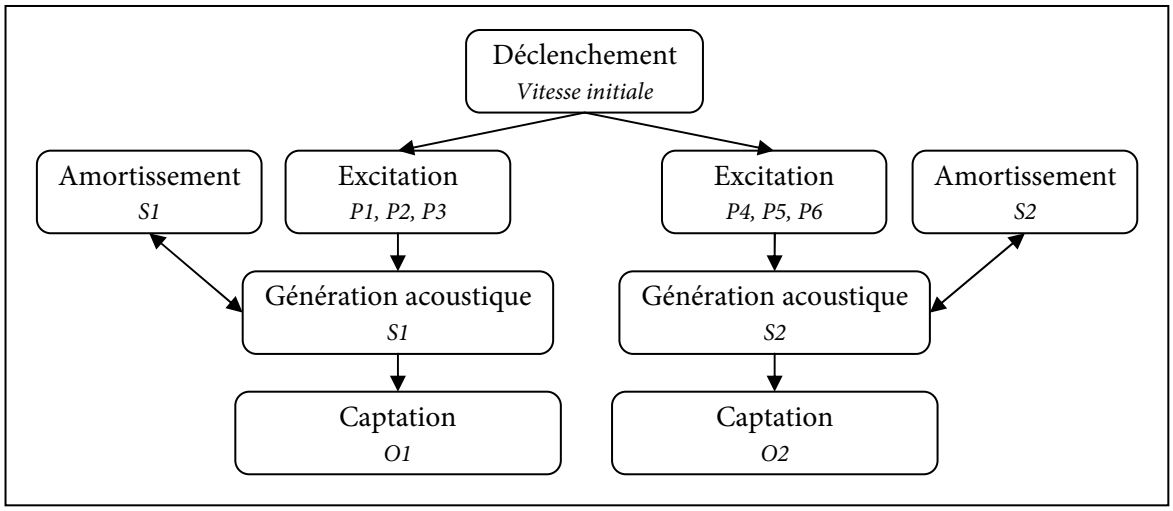


Figure 78 : Graphe fonctionnel du modèle « Super Maracas »

Comme le montre le graphe, le modèle est relativement simple du point de vue fonctionnel. Sa spécificité se situe en réalité au niveau des paramètres, dont nous avons évalué le rôle en faisant varier leurs valeurs – démarche que nous avons nommée *étude par modification* (cf. p. 169).

On observe tout d'abord que les coefficients de raideur des modules BUT et REF sont très élevés dans l'ensemble du modèle par rapport à l'inertie des modules MAS de S1 et S2. Ils sont compris entre 0,5 et 0,7 environ, valeurs à comparer avec la limite empirique K < M, qui, lorsqu'elle est dépassé, entraîne un fort risque de divergence de la simulation. En divisant par 10 tous ces coefficients de raideur, les sons obtenus sont beaucoup plus ternes, il est donc clair que ces valeurs élevées de K par rapport aux inerties jouent un rôle important dans la brillance des sons produits.

On remarque également que les coefficients de viscosité des modules REF liant les MAS de S1 et S2 aux Chevalets sont eux-aussi relativement élevés (Z = 0,01, alors que la valeur par défaut est 100 fois plus petite). En divisant cette valeur par dix dans l'ensemble du modèle, on observe que la simulation diverge au bout de 9 secondes environ. En gardant les viscosités d'origine et en remplaçant les Chevalets par des modules SOL, la simulation diverge également, de manière encore plus rapide.

Ainsi, en modifiant les valeurs des paramètres du modèle et en observant l'effet de ces variations, on montre que le timbre particulier du « Super Maracas » est dû au fait que le modèle est « au bord de la divergence ». Un gain artificiel d'énergie, causé par les valeurs élevées des coefficients de raideur que par l'effet Thil explique la brillance du timbre produit. En effet, un niveau d'énergie élevé est synonyme, pour une structure maracassée, de mouvements rapides et donc d'oscillations acoustiques comportant des composantes à haute fréquence. Ce gain d'énergie est compensé à la fois par la viscosité des modules REF reliant les modules MAS des structures acoustiques aux Chevalets, et par la viscosité des Chevalets eux-mêmes. Ce modèle est donc un exemple d'utilisation à des fins créatives des cas limites où les algorithmes de simulation n'ont pas une cohérence physique parfaite au niveau énergétique.

2. Le modèle « RESPIRATIONS »

Le modèle « RESPIRATIONS » (Figure 79) est un exemple de modèle faisant appel à une possibilité de modélisation sans équivalent direct dans le monde réel : l'excitation par viscosité négative. Il contient en effet deux structures acoustiques primaires identiques (SP1 et SP2) constituées de modules CEL avec les paramètres suivants : M = 1, K = 0 et Z = - 0,0002. Ces modules sont liés entre eux par des modules BUT à seuil nul ; SP1 et SP2 sont donc des structures maracassées. Chacune comporte deux points de butée, des modules SOL situés respectivement à la position X = - 0,01 et X = 0,02.

Le mouvement des modules CEL est initié par la percussion d'un Déclencheur élémentaire (D). Dès ce moment, la viscosité négative des modules CEL entraîne l'accélération de leurs mouvements qui, si elle n'était pas contrôlée par des Etouffoirs (E1 et E2), conduirait à la divergence de la simulation.

Le module MAS (*m1* ou *m2*) de chacun des Etouffoirs est relié à chaque module CEL par un module BUT de viscosité Z = 0,0005.[1] Par ailleurs, *m1* et *m2* font chacun partie d'une Cellule non amortie (C1 et C2) ; ils ont donc un mouvement sinusoïdal, dont la fréquence est F = 0,08 Hz. Les conditions initiales de M1 et M2 sont telles que leurs mouvements sont en opposition de phase ; les Etouffoirs

[1] On note que cette valeur est largement supérieure en valeur absolue à la viscosité des modules CEL, ce qui assure que l'Amortissement externe réalisé par l'étouffoir fait perdre plus d'énergie que la viscosité négative n'en apporte.

agissent donc alternativement sur SP1 et SP2, s'éloignant et se rapprochant de celles-ci, de sorte que lorsque l'une voit son énergie croître, l'autre est au contraire amortie.

SP1 et SP2 sont toutes deux liées à trois structures acoustiques secondaires (nommées SS1 à SS6). Il s'agit de Chapelets de trois modules MAS (avec M = 0,01) reliés par des modules REF. Le lien entre les structures primaires et secondaires est réalisé par des modules REF identiques à ceux de ces Chapelets.

Seules les structures secondaires sont écoutées, par le biais de deux composants SOF+FRO (CA1 et CA2). Il est nécessaire d'utiliser ici de tels composants de Captation de structures mobiles, car les structures secondaires, entraînées par les modules CEL auxquels elles sont liées, ont un mouvement d'ensemble de plus grande amplitude que leurs oscillations propres. CA1 capte le mouvement des trois structures secondaires de gauche et d'une structure secondaire de droite ; la situations est inversée pour CA2. De cette manière, une spatialisation simple du son produit par la simulation est réalisée : les structures secondaires de gauche (respectivement de droite) sont majoritairement entendues dans le canal gauche (resp. droit).

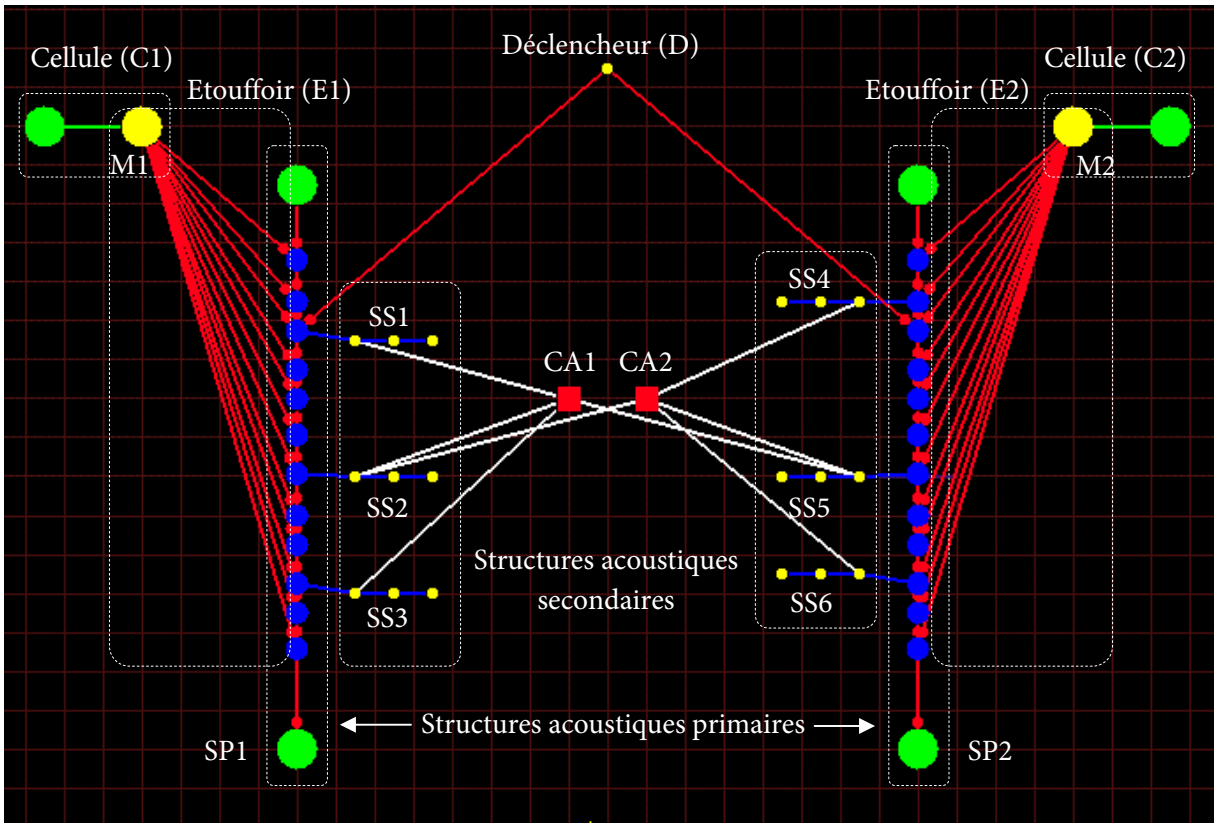


Figure 79 : Le modèles « RESPIRATIONS » sur l'Etabli GENESIS

Si on ne considère, par exemple, que la partie gauche du modèle, le comportement du modèle peut être décrit de la façon suivante :

- Lorsqu'E1 n'est pas « en contact » avec SP1, les modules CEL de celle-ci voient leur vitesse augmenter, ce qui entraîne une oscillation de plus en plus forte des structures secondaires SS1, SS2 et SS3. Le son croît alors en intensité.
- Lorsqu'E1 entre en contact avec SP1, le mouvement des modules CEL s'arrête progressivement sous l'effet de l'Amortissement externe. Les structures secondaires ne sont plus excitées et leur

oscillation s'amortit en raison de leur viscosité interne. Le son décroît en intensité, jusqu'à devenir inaudible.

- Il résulte de la succession de ces deux phases une évolution du son par « vagues » successives régulièrement espacées dans le temps, passant du silence à une amplitude maximale de valeur fixe.

Les structures acoustiques secondaires du modèle ont des modes de vibration propre quasi-harmoniques. Cependant, étant donné qu'elles subissent une excitation acoustique de la part de SP1 et SP2, ces modes ne sont pas directement audibles. SP1 et SP2 étant des structures maracassées, le mouvement de leurs modules CEL est pseudo-chaotique. Ainsi, l'excitation subie par les structures secondaires correspond à un mouvement désordonné, qui est « filtré » par les Chapelets. Il en résulte un son relativement étouffé, qui comporte une composante bruitée, mais dont la hauteur est identifiable et définie par l'accordage des Chapelets. Son timbre évoque une sorte de « souffle harmonique », ce qui a inspiré le nom du modèle.

Le graphe fonctionnel du modèle est donné dans la Figure 80. Le modèle étant complètement symétrique (mis à part les conditions initiales de m_1 et m_2 et les coefficients de raideur des structures acoustiques secondaires), on présente uniquement les fonctions et composants de la partie de gauche.

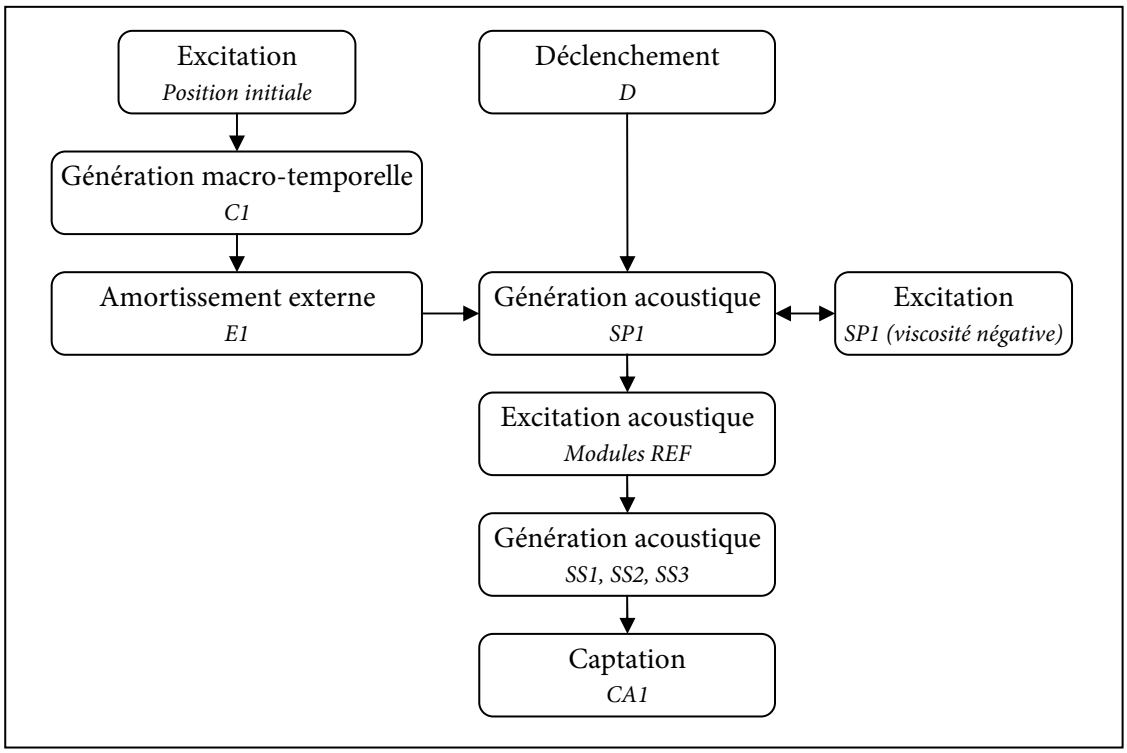


Figure 80 : Graphe fonctionnel du modèle « RESPIRATIONS »

Ce modèle comporte trois niveaux hiérarchiques : un niveau supérieur correspondant aux Cellules C1 et C2, un niveau intermédiaire correspondant aux structures acoustiques primaires et un niveau inférieur correspondant aux structures acoustiques secondaires. Chaque niveau se signale par une échelle inertielle particulière, les différentes échelles étant suffisamment différentes pour qu'on considère la hiérarchisation comme absolue.

3. Le modèle « CONDENSACORDE »

Le modèle « CONDENSACORDE » (Figure 81) illustre deux variantes de la fonction de Modification, la Perturbation élastique et la Modification structurelle dynamique.

Il est composé d'une dizaine de structures acoustiques libres et mobiles (Si), des Chapelets de modules MAS (d'inertie M = 1) reliés par des modules REF. Mis en mouvement par un Déclencheur élémentaire (D), ces Chapelets ont un mouvement d'ensemble qui les amène à rebondir entre deux points de butée (*M1* et *M2*), des modules MAS de très forte inertie ($M = 10^{20}$) situés de part et d'autre de la position X = 0. Chaque Chapelet est en effet connecté à *M1* et *M2* par au moins un module BUT élastique. La collision entre un Chapelet et un point de butée constitue une Perturbation élastique, qui a pour effet de modifier la répartition de l'énergie entre les modes de vibration de la structure acoustique et provoque par conséquent un évènement audible. Chaque Chapelet est d'ailleurs écouté à l'aide d'au moins un composant REF^{+}+SOF+REF^{-}, un composant de Captation de structures mobiles étant là-aussi nécessaire étant donné que les structures acoustiques se déplacent librement dans l'espace entre *M1* et *M2*.

Cet espace se rétrécit d'ailleurs au cours du temps ; en effet, *M1* et *M2* ont une vitesse initiale qui les fait se diriger lentement l'un vers l'autre. Leur distance est de 200 m au début de la simulation et de 4 m au bout d'une minute. Ce mouvement a évidemment pour effet d'augmenter progressivement la fréquence des collisions avec les Chapelets : il provoque donc un *accelerando* dans la séquence de sons produite. Le rapprochement de *M1* et *M2* se poursuit jusqu'au moment où chacun d'entre d'eux percute un autre module MAS immobile de même inertie (respectivement *M3* et *M4*). Ces collisions stoppent *M1* et *M2* qui transmettent intégralement leur vitesse à *M3* et *M4*.

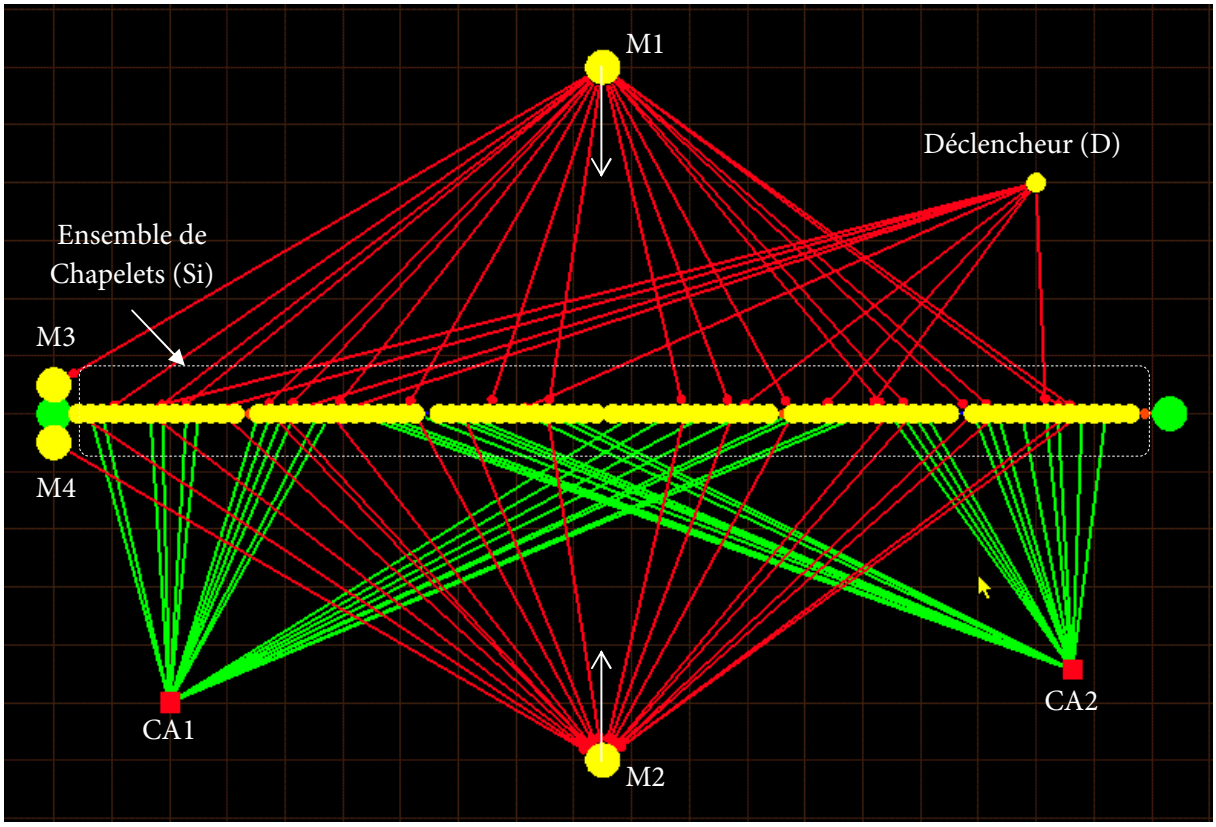


Figure 81 : Le modèle « CONDENSACORDE » sur l'Etabli GENESIS

Par ailleurs, l'extrémité de chaque Chapelet est reliée à celle du Chapelet voisin par une Liaison piège (Figure 82). Ainsi, lorsque deux Chapelets se « croisent » avec une vitesse relative suffisamment faible, une liaison élastique peut s'établir entre eux. Ils forment alors un nouveau Chapelet plus long, dont les modes de vibration sont différents – il a en particulier une fréquence fondamentale plus basse. Cette liaison est susceptible de se rompre ultérieurement si le nouveau Chapelet entre collision suffisamment violemment avec l'un des points de butée.

Dans l'état initial du modèle, les Chapelets sont à la même position X = 0 : toutes les Liaisons pièges sont donc actives et l'ensemble forme une Corde attachée à deux modules SOL. Mais cet état est rompu immédiatement par l'action du Déclencheur D, les Chapelets se détachent les uns des autres.

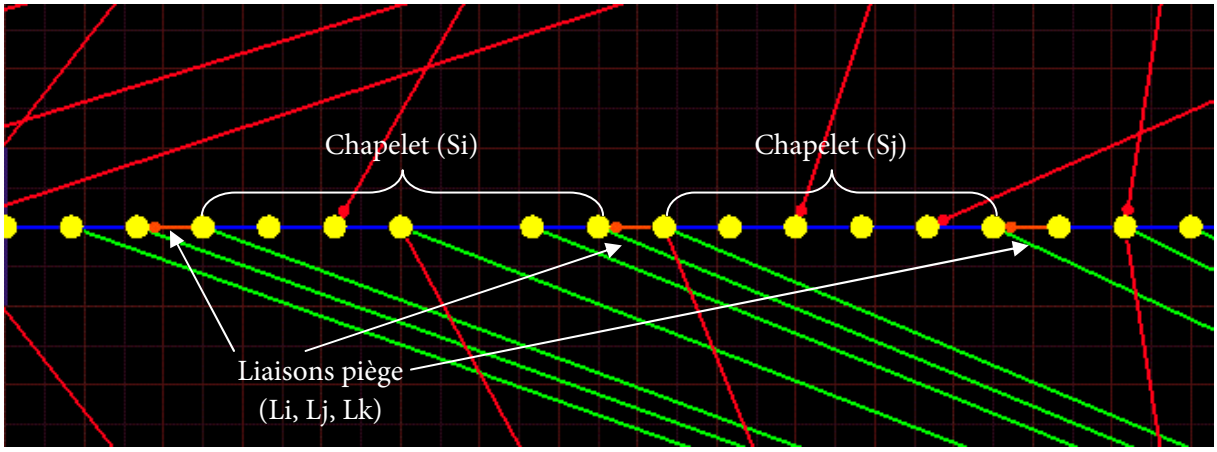


Figure 82 : Détail du modèle « CONDENSACORDE » faisant apparaître les Liaisons piège

Au bout d'environ 70 secondes de simulation, les Chapelets ont perdu suffisamment de vitesse de par leur viscosité interne pour que toutes les Liaisons soient à nouveau actives et que le modèle ne comporte plus qu'une seule structure acoustique. On peut donc considérer ce modèle comme une Corde qui explose en plusieurs fragments – lesquels vont rebondir contre des « parois » mobiles – puis se reconstitue progressivement.

Le graphe fonctionnel du modèle est donné dans la Figure 83. Par souci de lisibilité, on ne représente que deux Chapelets et on fait abstraction de la fonction d'Amortissement interne de ceux-ci. Ce modèle comporte seulement deux niveaux hiérarchiques : celui des points de butée (dont l'inertie est tellement élevée qu'ils sont « insensibles » aux collisions répétées avec les Chapelets) est le niveau supérieur, tandis que le celui des Chapelets est le niveau inférieur.

La séquence sonore produite par le modèle CONDENSACORDE a une dynamique globale clairement identifiable, provoquée par le fait que les points de butée se rapprochent (ce qui produit un accelerando) et par la reconstitution progressive de la Corde. Mais sa structure précise est imprévisible : elle dépend du « hasard des rencontres » entre les Chapelets et est donc fortement influencée par la vitesse transmise à chaque Chapelet par le Déclencheur et par les propriétés particulières de chacun d'entre eux. Il est clairement impossible de prévoir la séquence exacte de sons qui va être produite, mais plusieurs paramètres peuvent être manipulés afin de contrôler ses propriétés globales. Par exemple, on peut faire varier le seuil des Liaisons piège afin d'augmenter ou de diminuer la fréquence des connexions entre Chapelets voisins. Il est également possible d'intégrer les points de butée à une structure macro-temporelle pour que leur mouvement soit plus complexe qu'une simple translation uniforme. Un tel modèle s'ancre donc résolument dans une approche de la création musicale par génération, tout en disposant d'un potentiel expressif important.

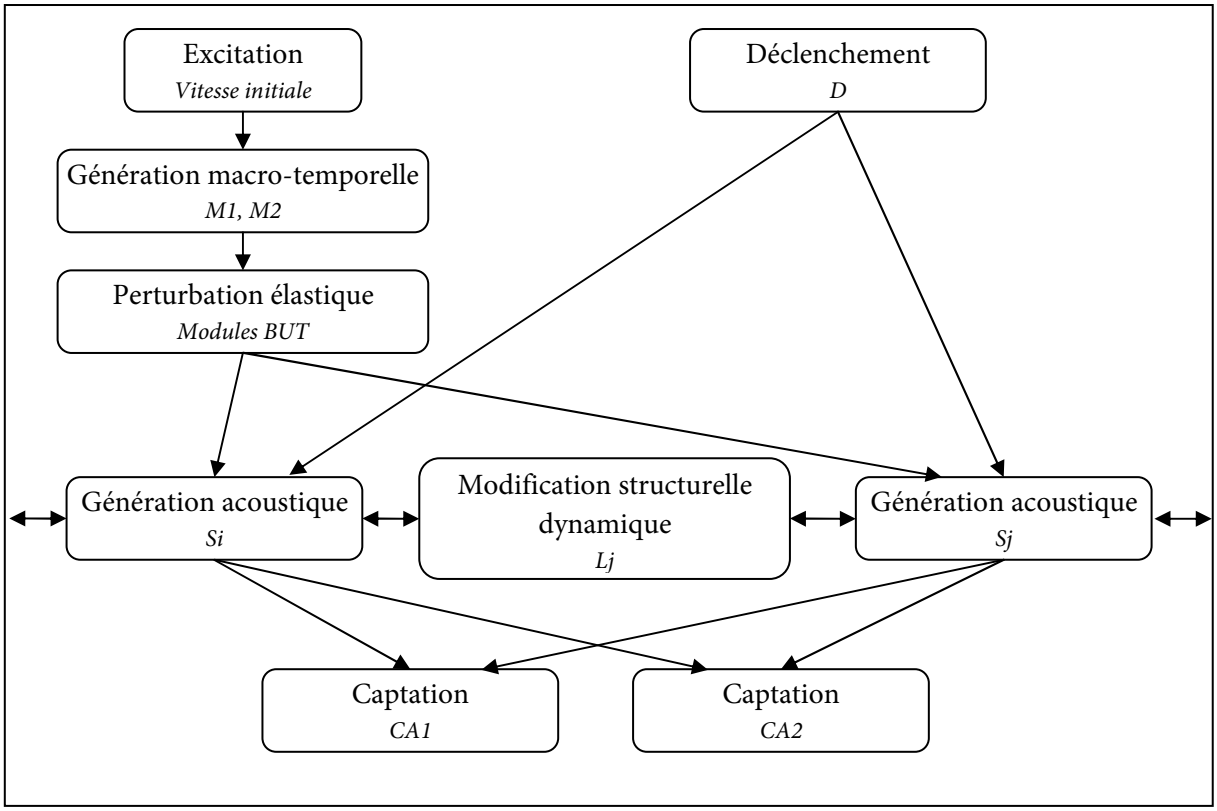


Figure 83 : Graphe fonctionnel du modèle « CONDENSACORDE »