HAL open science

Vers un instrumentarium pour les modèles musicaux CORDIS-ANIMA

Olivier Tache, Claude Cadoz

To cite this version:

Olivier Tache, Claude Cadoz. Vers un instrumentarium pour les modèles musicaux CORDIS-ANIMA. JIM' 09 - 14èmes Journées d'Informatique Musicale, Apr 2009, Grenoble, France. pp.171-178. hal-00436343

HAL Id: hal-00436343

https://hal.science/hal-00436343v1

Submitted on 26 Nov 2009

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.

VERS UN INSTRUMENTARIUM POUR LES MODELES MUSICAUX CORDIS-ANIMA

Olivier Tache
ACROE
olivier.tache@imag.fr

Claude Cadoz
ACROE & Laboratoire ICA
claude.cadoz@imag.fr

RÉSUMÉ

La modélisation physique propose un changement de paradigme dans l'Informatique Musicale, en se concentrant sur la modélisation de corps sonores virtuels plutôt que sur la modélisation des sons eux-mêmes. Elle conduit à reconsidérer en profondeur la relation entre le musicien et l'ordinateur, aussi bien au niveau conceptuel que pratique, en particulier lorsqu'il s'agit pour le musicien ou le compositeur de *pratiquer* la création de modèles. Des changements aussi importants nécessitent la mise à disposition d'outils d'apprentissage adaptés, prenant en compte les spécificités de la modélisation physique et allant plus loin que les concepts de bibliothèque de modèles et de tutorial qui sont souvent mis en pratique dans les environnements d'Informatique Musicale. Cet article introduit un cadre théorique et pratique, l'Instrumentarium, répondant à cette problématique dans le contexte du système de modélisation et de simulation CORDIS-ANIMA et dont l'objectif est de représenter de façon complète et structurée les possibilités offertes par ce formalisme. L'Instrumentarium comporte en particulier une ontologie des modèles musicaux CORDIS-ANIMA, s'appuyant sur une analyse fonctionnelle que nous présentons ici. Ces résultats pourraient être élargis afin de proposer une ontologie générale des modèles construits avec d'autres méthodes de modélisation.

1. INTRODUCTION

La modélisation physique est l'un des paradigmes les plus prometteurs en Informatique Musicale depuis les années 80. On considère généralement qu'elle offre la possibilité d'établir des interactions intuitives et expressives avec les algorithmes de synthèse sonore, et de produire des sons d'un grand réalisme [11] [14]. A un niveau plus fondamental, elle modifie de façon radicale la relation avec l'ordinateur, en réaffirmant l'importance de la matérialité et de la situation instrumentale dans le processus de création [1] [10].

Les modèles physiques sont de plus en plus utilisés par les compositeurs [7] [9], et le nombre de logiciels faisant appel à la modélisation s'accroît progressivement. Cependant, la diffusion de la modélisation physique peut sembler relativement lente si l'on considère l'immense intérêt suscité lorsqu'elle a commencé à être largement connue [15]. Ceci s'explique par plusieurs facteurs, dont le premier est probablement le « fossé » entre des promesses initiales quelques peu grossies par les préconceptions concernant les réalités virtuelles et les possibilités réellement offertes jusqu'à présent. En effet, la modélisation physique ne permet aujourd'hui de synthétiser des sons réellement réalistes que pour un nombre limité de familles d'instruments, et les interfaces haptiques, qui permettent effectivement de mettre en place des interactions d'un nouveau genre avec les modèles, ne sont pas encore disponibles à large échelle, ni à des tarifs abordables.

La façon dont la modélisation physique est proposée à l'utilisation constitue un autre problème. Tandis que les environnements modulaires basés sur le traitement du signal, comme Max/MSP ou Reaktor, connaissent une popularité croissante, seul un nombre très limité d'environnement modulaires de modélisation physique existent aujourd'hui. La plupart des outils basés sur la modélisation physique sont disponibles sous la forme d'instruments virtuels prêts à l'emploi, qui permettent uniquement de changer certains paramètres du modèle sous-jacent et ne donnent pas accès à sa structure interne. Or, cette approche – qui vise bien évidemment à proposer des outils faciles à utiliser – masque le potentiel réel des méthodes de modélisation. La *pratique* de la modélisation (et non *l'utilisation de modèles*) dans un environnement modulaire est probablement la meilleure façon pour l'utilisateur de découvrir ce potentiel [5], notamment en ce qui concerne la synthèse de sons non réalistes – bien que plausibles – et la génération de structures musicales grâce à des objets physiques virtuels.

La modularité présente des avantages bien connus par rapport aux approches non modulaires ; elle est un gage de généralité pour les environnements qui y font appel, et elle offre à l'utilisateur une liberté inégalable. En contrepartie, elle est plus exigeante en matière de compétences, de temps et d'expérience. Dans les environnements basés sur le traitement du signal – dont on peut dire qu'ils font partie d'une « culture du signal » presque universelle – les difficultés inhérentes à la modularité sont généralement traitées en mettant à la disposition de l'utilisateur des tutoriaux et une librairie bien fournie de modèles. En ce qui concerne la modélisation physique, ces moyens sont insuffisants étant donné que les concepts fondamentaux que les utilisateurs doivent appréhender pour pouvoir la pratiquer sont loin d'être aussi répandus que ceux des « approches signal ». Face à ce constat, il est tout à fait évident qu'une diffusion réussie de ces nouvelles

méthodes de création passe nécessairement par le développement de nouveaux outils permettant la transmission des connaissances entre les modélisateurs experts et les utilisateurs finaux.

Dans le contexte des modèles physique masses-interactions CORDIS-ANIMA [2], nous avons abordé cette question en concevant un cadre conceptuel et pratique, appelé *Instrumentarium*, qui va au-delà des notions de bibliothèque de modèles ou de tutorial [13]. Le projet Instrumentarium vise à proposer une ontologie des modèles CORDIS-ANIMA [8] utilisés pour la création musicale et ainsi à expliciter en quoi les éléments fondamentaux de ce formalisme « font système » dans ce domaine. A un deuxième niveau, il a pour objectif de fournir des informations techniques essentielles pour la pratique (analyse du comportement de modèles, présentation de techniques de modélisation, utilisation et configuration de composants, etc.).

Le cœur du niveau conceptuel de l'Instrumentarium est constitué d'une liste de fonctions correspondant aux différents rôles que peuvent avoir les parties d'un modèle. Elles décrivent d'une façon très générale la manière dont un modèle produit son résultat sonore ou musical, et sont par conséquent un outil fondamental pour la compréhension et la création des modèles.

Après avoir rappelé les principes essentiels de CORDIS-ANIMA (Section 2), nous présenterons de façon plus détaillée le projet Instrumentarium (Section 3) pour nous focaliser sur ses aspects relatifs à l'analyse fonctionnelle (Section 4).

2. CORDIS-ANIMA

CORDIS-ANIMA est un système modulaire de modélisation et de simulation d'objets physiques, utilisé pour la création musicale, la synthèse de mouvements visuels et la simulation multisensorielle interactive [2]. Un modèle CORDIS-ANIMA est un réseau constitué d'*éléments matériels* (les modules <MAT>) et d'éléments de liaison (les modules <LIA>). Un module <LIA> simule une interaction entre deux modules <MAT>. A chaque étape de la simulation, il calcule deux forces opposées selon la différence de position et/ou de vitesse de ceux-ci. Un module <MAT> calcule sa position courante en fonction de la somme des forces reçues par des modules <LIA> à l'étape précédente de la simulation (Figure 1).

Tous les environnements de modélisation basés sur CORDIS-ANIMA proposent 5 types de modules élémentaires : deux modules <MAT>, le MAS (masse ponctuelle) et le SOL (point fixe), et trois modules <LIA> linéaires (RES, FRO et REF) qui correspondent respectivement à un ressort, à une friction visqueuse et à un ressort viscoélastique. L'une des caractéristiques les plus importantes de CORDIS-ANIMA est la prise en compte générale des interactions non linéaires, permettant de modéliser un large éventail de phénomènes et de comportements physiques. Différents modules <LIA> non linéaires sont proposés selon les applications.

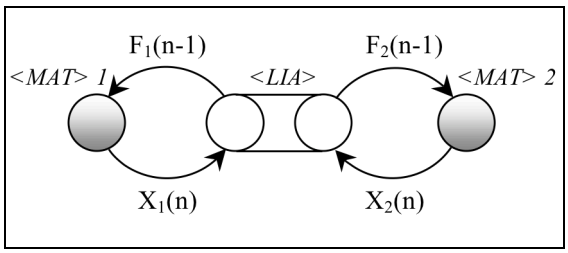

Figure 1. Calcul des forces et des positions dans un modèle CORDIS-ANIMA composé de deux modules <MAT> et d'un module <LIA>.

Les réseaux CORDIS-ANIMA peuvent être construits soit par programmation textuelle (en particulier avec le langage dédié PNSL [6]) ou à l'aide d'une interface graphique interactive.

2.1. Application à la création musicale

Les modèles mis en oeuvre pour la création musicale comprennent généralement plusieurs objets situés à des fréquences différentes. D'un côté, les *objets micro-temporels* (ou *acoustiques*) ont des modes de vibration situés dans le domaine audible et peuvent être vus comme des « instruments virtuels » ; ils sont responsables de la production du son. De l'autre, les *objets macro-temporels* ont soit des oscillations situées en dessous du domaine audible, soit aucune oscillation ; ils produisent des mouvements qui peuvent être utilisés comme des « gestes » virtuels appliqués à d'autres objets, que ceux-ci soient micro- ou macro-temporels, par exemple pour réaliser l'excitation ou l'étirement d'une structure vibrante. La coexistence de plusieurs échelles temporelles permet de générer des formes macro-temporelles et donc des structures musicales. Plusieurs pièces de musique ont d'ailleurs été entièrement réalisées avec un seul modèle CORDIS-ANIMA [3].

2.2. GENESIS

GENESIS est un environnement graphique pour la création musicale, basé sur CORDIS-ANIMA [4] [6]. Son interface permet à l'utilisateur de créer des modèles en manipulant à la souris les modules élémentaires disposés sur un établi virtuel. Un certain nombre d'outils sont disponibles pour réaliser rapidement des tâches courantes, comme l'édition de paramètres de nombreux modules simultanément et la génération automatique d'objets (cordes, membranes, etc.).

Dix modules physiques sont implémentés dans GENESIS. En plus des modules de base évoqués précédemment, deux interactions non linéaires sont disponibles : le module BUT (« butée ») qui permet principalement la simulation de collisions, et le module LNL, une interaction complètement définie par l'utilisateur permettant de simuler une grande variété d'objets et de phénomènes : structures acoustiques non linéaires, frottement d'archet, pincement, etc.

Les travaux décrits dans cet article sont basés sur des modèles réalisés avec GENESIS.

3. DESCRIPTION DU PROJET INSTRUMENTARIUM

L'objectif du projet Instrumentarium est de proposer un cadre général pour l'apprentissage de la création avec les modèles physiques CORDIS-ANIMA. Celui-ci se concrétisera en particulier par l'intégration de différents éléments à l'environnement didactique de GENESIS :

- Une présentation du système conceptuel représentant de façon générale l'organisation interne des modèles ;
- Une série de documents ciblés décrivant les objets physiques et les techniques de modélisation les plus courants et donnant des détails pratiques sur leur utilisation (contexte, paramétrage, référence à des objets ou des phénomènes réels, etc.) ;
- Une vaste librairie de modèles, structurée selon les principes du système conceptuel.

3.1. Motivations

Le système conceptuel que nous venons d'évoquer est l'élément qui distingue l'Instrumentarium des environnements d'apprentissage habituellement proposés pour les logiciels de création musicale. Son originalité et son intérêt résident dans le fait qu'il apporte une compréhension globale des possibilités offertes par CORDIS-ANIMA, au lieu de les introduire d'une façon linéaire qui permettrait beaucoup plus difficilement de s'en faire une représentation complète. Cette nouvelle approche est indispensable afin de pratiquer de façon créative et efficace la modélisation physique avec GENESIS. En effet, CORDIS-ANIMA est basé sur un nombre de modules très restreint par rapport à la plupart des environnements modulaires de création musicale. Cette modularité « extrême » a un impact très positif dans le processus d'apprentissage, en particulier lors des premiers contacts avec ce paradigme de modélisation : en effet, la découverte de ses bases ne demande que la compréhension d'un nombre limité de modules, qui sont associés à des concepts intuitifs, tels que l'inertie, la vitesse, l'élasticité ou le frottement. En contrepartie, ceci implique que la création avec CORDIS-ANIMA repose sur une approche de relativement bas niveau, puisque les modèles sont construits par assemblage de modules élémentaires au comportement très simple. Par conséquent, il peut être difficile pour un utilisateur non expérimenté d'imaginer quel objet ou quel modèle peut réaliser une idée sonore ou musicale précise. Les comportements complexes, susceptibles d'entrer dans le champ musical, émergent 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. Ceci ne peut pas être fait sans une représentation claire et complète de ce qu'est un modèle et de comment il peut être structuré.

Depuis la première version de GENESIS, plus de 50.000 modèles ont été réalisés. Bien que très différents les uns des autres, ils partagent de façon évidente certains schémas d'organisation. Ceci est particulièrement significatif dans la mesure où ces modèles ont été réalisés avant qu'une « théorie générale » des modèles musicaux CORDIS-ANIMA soit proposée. En particulier, alors que les utilisateurs les plus expérimentés de GENESIS ont développé leur savoir-faire principalement par eux-mêmes, ils ont abouti à des schémas de modélisation similaires. On peut alors dire que de la pratique émerge un « langage » propre à la création musicale s'appuyant sur les modèles CORDIS-ANIMA. L'un des objectifs principaux du projet Instrumentarium est de spécifier ce langage en tant que partie intégrante des connaissances relatives à la création musicale avec cet outil, afin de pouvoir le transmettre aux nouveaux utilisateurs.

3.2. Travaux précédents

Une première structuration des modèles CORDIS-ANIMA a été proposée avant le début du projet Instrumentarium. Elle prend la forme d'une hiérarchie de composants physiques directement inspirée de l'analyse de la chaîne d'éléments menant, dans la situation instrumentale traditionnelle, des gestes instrumentaux à la perception du son par l'auditeur : excitateur, structure vibrante, résonateur, environnement aérien, etc. Cette hiérarchisation prend également en compte les aspects compositionnels, à travers deux catégories de composants : les « Instrumentistes » et les « Chefs ». De façon métaphorique, ces composants ont le même rôle que leurs référents réels : l'Instrumentiste « joue » d'un corps sonore à l'aide d'un excitateur, et le Chef a pour fonction d'activer ou d'arrêter un ou plusieurs Instrumentistes. Notons que, dans cette proposition, les catégories de composants sont directement associées à des modules ou des réseaux CORDIS-ANIMA précis : il s'agit donc d'un système relativement fermé, alors que de nombreux autres composants que ceux décrits pourraient remplir le même rôle.

Cette approche est cohérente, car il est effectivement possible de construire et d'analyser des modèles selon cette hiérarchisation. Cependant, elle présente un manque évident de généralité – qui était déjà connu lors de sa formulation. La référence constante à la situation instrumentale traditionnelle masque en effet la possibilité de construire des modèles tout à fait pertinents du point de vue sonore et musical, dont la structure ne s'y conforme pas voire qui ne pourraient même pas exister dans le monde réel. Il est impossible d'ailleurs impossible d'analyser certains modèles de manière non ambiguë de cette façon. Par exemple, une corde dotée d'un coefficient de viscosité négatif (une

situation impossible dans la réalité, le frottement apportant de l'énergie au lieu d'en faire perdre) est à la fois une structure vibrante et une source d'énergie. Bien qu'il n'y ait pas d'excitateur dans ce modèle, une excitation à bien lieu en permanence lorsque la corde est en mouvement.

Par ailleurs, en ce qui concerne l'aspect compositionnel, il faut noter que les modèles peuvent comporter d'avantage de niveaux de structuration que ceux proposés (l'Instrumentiste et le Chef). On peut par exemple imaginer l'existence de « Super-Chefs », et ainsi de suite.

En fonction de ces remarques, et afin de garantir la généralité de l'Instrumentarium, nous avons évité au maximum les références à la situation musicale traditionnelle et aux instruments acoustiques dans nos travaux. Ceci peut paraître surprenant dans le contexte de la modélisation physique, qui se prête particulièrement à de tels rapprochements, mais nous considérons que l'utilisation d'un vocabulaire emprunté aux situations réelles n'est pas la meilleure manière de décrire de façon générale des modèles dont certains sont particulièrement abstraits. De même, nous n'avons pas pris en compte les interprétations perceptives ou musicales des modèles et des phénomènes qu'ils produisent, jugeant que ces aspects devraient rester ouverts aux utilisateurs, en fonction des approches de chacun d'entre eux. De façon générale, l'Instrumentarium se limite à parler des objets et des phénomènes physiques, afin de ne pas orienter le processus d'apprentissage.

3.3. Structuration de l'ontologie des modèles CORDIS-ANIMA

En tant que système conceptuel, l'Instrumentarium comporte trois niveaux qui constituent une ontologie des modèles musicaux CORDIS-ANIMA, chacun étant construit sur le précédent. Le premier niveau est basé sur la distinction entre les aspects structurels et fonctionnels des modèles, et spécifie le vocabulaire élémentaire permettant de décrire sans ambiguïté l'organisation des réseaux CORDIS-ANIMA – ce qui constitue une étape cruciale et délicate étant donné leur complexité et leur diversité. Le second niveau décrit les différentes fonctions qui peuvent être réalisées dans un modèle par ses constituants. Enfin, le troisième niveau présente les principaux schémas d'organisation mis en œuvre lors de la construction de modèles.

3.3.1. Premier niveau : analyse structurelle et fonctionnelle des modèles

Dans le premier niveau, les modèles sont considérés comme des systèmes généraux (au sens de la Systémique) envisagés selon deux points de vue complémentaires (Figure 2).

Du point de vue *structurel*, un modèle est considéré comme un ensemble de *structures en interaction*. Une structure correspond dans ce contexte à la notion courante d'objet matériel. Elle est définie comme une partie solide, indépendante et clairement identifiée d'un modèle. Ceci signifie en particulier que :

- l'énergie se propage librement en son sein : tout apport d'énergie provoque donc la mise en mouvement de tous les modules <MAT> mobiles ;
- « l'éclatement » de la structure (c'est-à-dire le fait que certains modules s'éloignent librement des autres à un moment donné de la simulation) est impossible. Ceci implique que tout module <MAT> doit être relié à au moins un autre par une interaction élastique.

Du point de vue *fonctionnel*, un modèle est défini comme un ensemble de *composants* interconnectés, chacun réalisant une *fonction* et contribuant au résultat global de la simulation. Une fonction correspond au rôle d'une partie d'un modèle à un niveau physique, par exemple « produire une vibration à une fréquence audible » ; il s'agit donc le plus souvent d'une action physique. Un composant peut être un module, une structure (par exemple, une corde ou une membrane) ou un ensemble de structures. Un réseau CORDIS-ANIMA donné aura différents rôles selon le contexte dans lequel il est utilisé, il ne doit donc pas être considéré comme un composant en soi. Par ailleurs, de nombreux composants différents peuvent réaliser une même action

L'identification des fonctions réalisées dans un modèle et des composants associés est appelée l'*analyse fonctionnelle*. Elle permet de construire un graphe fonctionnel résumant l'organisation du modèle à ce niveau, c'est-à-dire la composition des différentes fonctions en vue de la production du résultat final. Cette représentation associe chaque fonction au composant qui la réalise, les flèches représentant l'application d'une fonction à un composant.

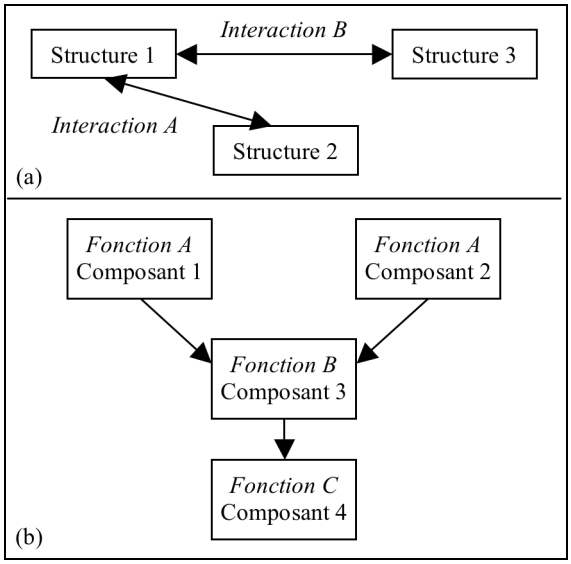

Figure 2. Représentation structurelle (a) et fonctionnelle (b) des modèles physiques.

La distinction entre ces deux approches des modèles est l'une des clés de l'Instrumentarium. En effet, le fait de séparer la fonction de l'objet permet de comprendre

la structuration d'un modèle sans avoir à prendre en considération les nombreuses variables (types d'interactions, paramètres physiques, conditions initiales, etc.) qui déterminent son comportement exact. Il est alors possible, dans une première étape, d'analyser ou de créer des modèles à un niveau plus élevé que celui des modules pris individuellement, ce qui est, bien entendu, d'une grande importance lorsqu'il s'agit de modèles composés de milliers d'entités élémentaires.

3.3.2. Second niveau : les fonctions

La liste de fonctions que nous avons établie (cf. section suivante) permet de décrire de façon complète comment un modèle « marche » au niveau physique. Par rapport à la proposition précédente, cette approche ne se focalise plus sur les objets, mais sur le domaine plus général des actions physiques, ce qui permet de prendre en compte des modèles ayant une organisation inhabituelle, comme la corde à viscosité négative évoquée ci-dessus. L'Instrumentarium fait référence à des composants précis, cependant ceux-ci ne sont plus comme précédemment les représentants de catégories prédéfinies, mais simplement des exemples illustrant différentes façons de réaliser les fonctions.

3.3.3. Troisième niveau : principaux schémas d'organisation

Le troisième niveau traite principalement de la structuration des modèles en niveaux hiérarchiques basés non pas sur des rôles différenciés, mais sur les différentes échelles d'inertie des structures qui les composent. En effet, les inerties des structures macro- et micro-temporelles diffèrent généralement de plusieurs ordres de grandeur, de sorte que le comportement des premières est indépendant de celui des secondes. Cette technique de modélisation fondamentale permet de construire des composants qui agissent sur d'autres sans être influencés en retour, un situation nécessaire pour des applications compositionnelles – comme la production d'un rythme régulier – qui se basent sur un découplage entre les niveaux micro- et macro-temporels. Il est ensuite possible de faire varier le degré de hiérarchisation en jouant sur la différence entre les échelles d'inertie. On peut ainsi passer continûment du cas où l'interaction entre deux structures est unidirectionnelle (on retrouve alors la situation de *contrôle*, caractéristique des systèmes à traitement du signal) à celui où elle est bidirectionnelle.

4. LES FONCTIONS PHYSIQUES

Afin de concevoir l'Instrumentarium en minimisant la tendance – naturelle – à être influencés par notre propre pratique de GENESIS et le risque d'oublier certains aspects, nous avons adopté une démarche *bottom-up*, partant du corpus des modèles GENESIS réalisés depuis la première version de l'environnement pour élaborer les concepts de l'ontologie. Nous avons tout d'abord réalisé un inventaire de ces modèles, qui nous a conduit à dresser une liste d'environ 150 « éléments » (types de modèles, composants, techniques de modélisation, phénomènes physiques, etc.) caractérisant la création musicale avec CORDIS-ANIMA. Ces éléments ont ensuite été regroupés en différentes catégories, parmi lesquelles 9 ont été identifiées comme des fonctions.

4.1. Fonctions fondamentales

Plusieurs conditions doivent être remplies pour qu'un modèle puisse produise des sons utilisables : il doit contenir au moins une structure micro-temporelle, qui va produire les oscillations audibles ; celle-ci doit être mise en mouvement, ce qui implique qu'elle soit connectée à une source d'énergie, ou qu'elle en intègre une ; enfin, ses mouvements doivent être captés. Dans la plupart des cas, le modélisateur prendra également soin d'ajouter un amortissement à son modèle (par exemple en utilisant des interactions viscoélastiques pour construire la structure micro-temporelle), à moins qu'il souhaite travailler avec des sons qui ne s'arrêtent jamais.

De ces conditions, on tire directement une liste de quatre fonctions qui doivent nécessairement être réalisées dans tout modèle sonore : la *Génération acoustique* (la production de mouvements à fréquence audible), l'*Excitation* (la transmission d'énergie d'une source vers une structure), l'*Amortissement* et la *Captation*. Les trois dernières fonctions peuvent aussi bien s'appliquer au niveau macro-temporel que micro-temporel, ce qui est important pour la généralité de l'ontologie proposée.

4.2. Fonctions facultatives

Ces fonctions ne sont pas directement nécessaires pour produire un son ; elles sont toutefois présentes dans la plupart des modèles un tant soit peu élaborés.

La *Génération macro-temporelle* est l'équivalent de la génération dans le domaine macro-temporel. Elle correspond à la production de mouvements à basse fréquence par une structure.

La *Modification* est l'action de modifier les propriétés ou le comportement d'une structure en cours de simulation. On distingue trois sous-catégories : la perturbation élastique (c'est-à-dire le fait de confiner les mouvements de modules <MAT> dans une zone déterminée à l'aide de butées élastiques), l'étirement, et la modification structurelle dynamique [12]. La modification d'une structure acoustique permet en particulier d'obtenir des changements dynamiques du timbre ou de la hauteur du son qu'elle produit.

Le *Déclenchement* est un type particulier d'Excitation. Il correspond au lancement d'un « processus physique » (c'est-à-dire une succession d'évènements unis par un lien de causalité) par la transmission d'une quantité d'énergie entre une source et une structure cible. Cette fonction revêt une

importance toute particulière au niveau compositionnel, puisque le fait de programmer un déclenchement (qui peut entraîner la production d'une structure musicale élaborée) peut être vu comme un acte d'*écriture*.

Les deux dernières fonctions sont d'un niveau plus élevé que celles qui précèdent. Elles sont encore peu utilisées, toutefois elles répondent à des besoins importants et seront par conséquent développées dans un futur proche.

La *Métrologie* correspond à la réalisation de mesures (de position, de vitesse, d'accélération, etc.) à l'intérieur d'un modèle grâce à des composants dédiés. Il existe par exemple des composants, construits uniquement à l'aide de modules CORDIS-ANIMA, permettant de réaliser une forme d'analyse spectrale à l'intérieur même d'un modèle. L'utilisation de tels composants permet de s'informer sur le déroulement d'une simulation, mais aussi de contrôler le comportement d'une partie d'un modèle en fonction de celui d'une autre partie. On peut ainsi réaliser de façon complètement physique des opérations logiques s'intégrant à des processus compositionnels. Par exemple, il est possible d'arrêter automatiquement les mouvements d'une structure A lorsqu'une structure B est excitée pour la première fois, et ce sans que le modélisateur ne connaisse à l'avance le moment où cet événement se produira.

Enfin, l'*Initialisation* est l'action de placer une structure dans un état physique donné (exprimé en fonction de la position et de la vitesse de ses modules <MAT>) afin de l'utiliser (ou de la réutiliser) dans un objectif précis. Certains composants doivent en effet se trouver dans un certain état initial pour remplir leur fonction, état qui peut ne pas être celui dans lequel il se trouve à l'issue d'une première utilisation. La capacité de réinitialiser un composant (au lieu d'en utiliser une nouvelle copie à chaque fois qu'on en a besoin) permet de produire des modèles plus légers, à la fois au niveau du coût cognitif et du coût en temps de calcul

4.3. Composition des fonctions

Les fonctions physiques que nous venons de décrire rapidement peuvent être intégrées dans un schéma de composition global (Figure 3).

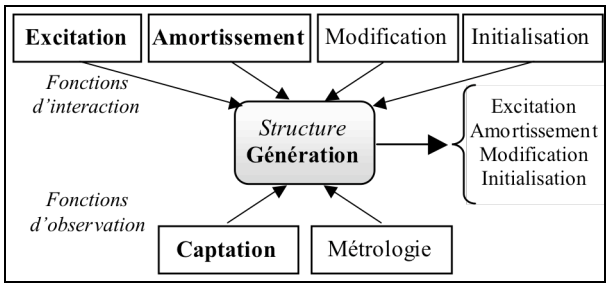

Figure 3. Application des fonctions physiques à une structure. Les fonctions fondamentales sont notées en gras.

Cette représentation est centrée sur une structure remplissant la fonction de Génération acoustique ou macro-temporelle. Elle peut être excitée, amortie, modifiée ou initialisée, et ses mouvements peuvent être captés ou mesurés. L'Excitation, l'Amortissement, la Modification et l'Initialisation sont appelées des *fonctions d'interaction*, car elles affectent l'état physique de la structure. Au contraire, la Captation et la Métrologie ont une influence nulle ou négligeable sur son comportement, elles sont donc appelées les *fonctions d'observation*.

Toute structure d'un modèle est considérée comme un « agent » pouvant participer à la réalisation de différentes fonctions à l'aide de composants correspondants. Par exemple, un oscillateur accordé à la fréquence de 0,1 Hz peut être utilisé pour amortir une structure acoustique toutes les 10 secondes.

Ce schéma de composition des fonctions n'impose aucune restriction sur le nombre de niveaux hiérarchiques et peut être appliqué de façon récursive : une structure agit sur une seconde, qui agit elle-même sur une troisième et ainsi de suite. Il ainsi possible de conceptualiser des modèles présentant un degré de structuration arbitrairement élevé.

4.4. Exemple : la « Condensacorde »

Le modèle GENESIS « Condensacorde » (Figure 4) est une corde virtuelle composée de six segments pouvant se détacher les uns des autres lorsque l'amplitude de ses oscillations devient forte ; chaque segment est en effet connecté à ses voisins par une liaison viscoélastique qui s'interrompt lorsque leur distance est supérieure à un certain seuil.

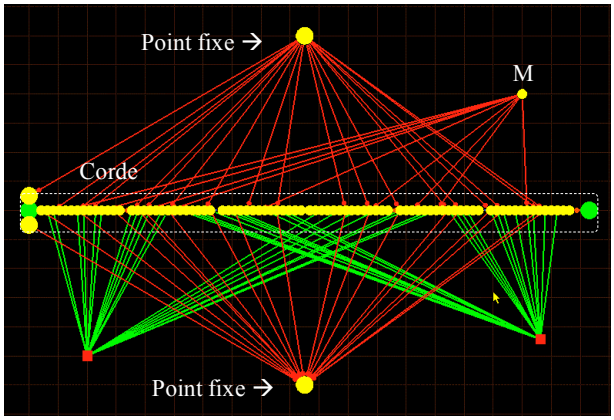

Figure 4. Le modèle "Condensacorde" sur l'établi GENESIS.

Au début de la simulation, la corde est entièrement brisée par une collision avec une masse (M) ; ses segments vont alors commencer à rebondir entre deux points fixes situés de part et d'autre de la position initiale, à une fréquence située dans le domaine macro-temporel. Perdant progressivement leur énergie lors de ces rebonds, ils se connectent à nouveau jusqu'à ce que la corde se reforme finalement.

Ce modèle est pour le moins inhabituel : il ne correspond en effet à aucun instrument acoustique – tout juste peut-on le rapprocher de la famille des maracas en

raison de la présence de « grains » qui s'entrechoquent dans une zone fermée – et il est probablement impossible de construire un tel objet dans le monde réel. En outre, la production du son se fait d'une manière particulière : un événement sonore est produit à chaque fois qu'un segment percute l'un des points fixes ou que deux segments se croisent, se connectent un instant puis se déconnectent à nouveau du fait de leur vitesse propre. À l'exception de la masse provoquant la fragmentation initiale de la corde, ce modèle ne comprend pas d'excitateur à proprement parler ; il produit pourtant une séquence complexe de sons, composée de nombreux événements distincts.

Grâce à l'analyse fonctionnelle que nous avons présentée, on peut donner une représentation complète de la façon dont ce modèle fonctionne, ce qui serait impossible avec les concepts traditionnels issus des instruments acoustiques (Figure 5). Les segments de corde sont des composants de Génération acoustique, qui sont excités par la collision initiale. Les interactions reliant les segments entre eux sont des composants de Modification – plus précisément, ils réalisent une modification structurelle temporaire ; ils sont à l'origine d'une partie des évènements sonores produits par le modèle, lorsqu'une connexion est établie ou interrompue.

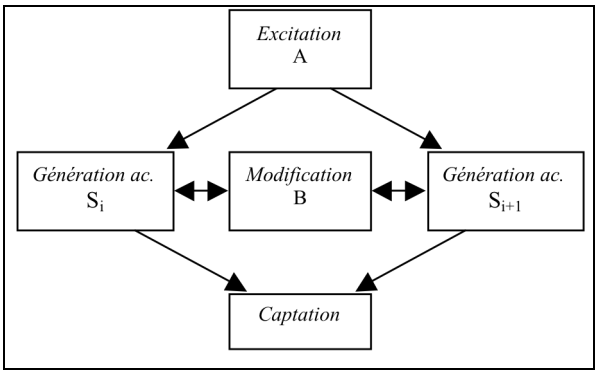

Figure 5. Graphe fonctionnel simplifié du modèle « Condensacorde ». Seuls deux segments de cordes (S_i et S_{i+1}) sont représentés, et les interactions avec les points fixes ont été omises.

5. CONCLUSION

Comme le montre l'exemple du modèle « Condensacorde », l'ontologie des modèles musicaux CORDIS-ANIMA que nous proposons permet de représenter de façon non ambiguë l'organisation structurelle et fonctionnelle d'objets virtuels complexes, n'ayant pas de lien avec les instruments réels et présentant des mécanismes originaux de production sonore. La validation de cette ontologie a été amorcée par l'analyse d'une grande quantité de modèles de ce type, et d'autres plus classiques, ainsi que la création d'une pièce musicale, *Utsikten* (O. Tache, 2007), qui a mis en œuvre ses principes.

Ainsi un ensemble restreint et structuré de concepts fondamentaux nous a permis de construire un système conceptuel qui semble à même de rendre compte, à un niveau physique, des différentes possibilités offertes par CORDIS-ANIMA en matière de création musicale.

Le projet Instrumentarium n'est pas pour autant terminé, puisqu'il reste à concrétiser ce système, en commençant par la réalisation des parties correspondantes dans l'environnement didactique de GENESIS. Par ailleurs, l'Instrumentarium doit maintenant être confronté à la pratique de nombreux utilisateurs sur une période de temps étendue, dans des situations d'apprentissage et de création. C'est en effet la seule manière d'évaluer la pertinence pédagogique et créative d'un système conceptuel de cette portée et de cette complexité, et d'identifier les aspects qui devront être améliorés. La conception de l'Instrumentarium coïncide avec la sortie d'une nouvelle version de GENESIS (G^3). Le nombre potentiel d'utilisateurs s'accroîtra de façon importante avec celle-ci, puisqu'il s'agit d'un environnement multi-plateforme (Windows, Mac OS X, Linux), tandis que la version précédente était uniquement destinée au système d'exploitation IRIX. On peut ainsi s'attendre à ce qu'une importante communauté d'utilisateurs contribue prochainement aux évolutions futures de l'Instrumentarium.

A un niveau plus théorique, nos travaux pourraient ouvrir de nouvelles perspectives pour la modélisation physique dans l'Informatique Musicale. Les différentes méthodes de modélisation disponibles actuellement sont très différentes les unes des autres, étant donné qu'elles ne sont pas basées sur les mêmes notions et les mêmes techniques. Cependant, elles représentent toutes, d'une manière ou d'une autre, des objets physiques virtuels qui ont la même raison d'être : produire des sons et de la musique. Dans ce contexte, construire une ontologie commune à ces méthodes serait une étape décisive pour leur diffusion et pour celle de la modélisation physique en général, dans la mesure où cet outil permettrait de les présenter de façon unifiée et donc plus pédagogique. Par conséquent, nous étudierons très prochainement dans quelle mesure l'ontologie développée pour les modèles CORDIS-ANIMA pourrait être généralisée dans cet objectif.

6. REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été soutenus par le ministère de la Culture et de la Communication, et le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

7. REFERENCES

[1] Cadoz C., Luciani A. et J.L. Florens. Responsive Input Devices and Sound Synthesis by Simulation of Instrumental Mechanisms: The Cordis System. *Computer Music Journal*, 8(3), p. 60–73, 1984.

[2] Cadoz, C., A. Luciani et J.L. Florens. CORDIS-ANIMA: A Modeling and Simulation System for Sound and Image Synthesis – The General

Formalism. *Computer Music Journal*, 17(1), p. 19-29, 1993.
[3] Cadoz C., “The Physical Model as Metaphor for Musical Creation: “pico..TERA”, a piece entirely generated by physical model”, *Proceedings of the International Computer Music Conference*, Göteborg, Suède, 2002.
[4] Castagné, N. et C. Cadoz. GENESIS: A Friendly Musician-Oriented Environment for Mass-Interaction Physical Modeling. *Proceedings of the International Computer Music Conference*, Göteborg, Suède, 2002.
[5] Castagné, N. et C. Cadoz. "10 criteria for evaluating physical modelling schemes for music creation". In *Proceedings of the 6th Conference on Digital Audio Effects (DAFX-03)*, Londres, Royaume-Uni, 2003.
[6] Castagné, N. et C. Cadoz. GENESIS software paradigm update. *Soumis à l’International Computer Music Conference*, Montréal, Canada, 2009.
[7] Chafe, C. Case Studies of Physical Models in Music Composition. *Proc. 18th Intl. Cong. Acoustics (ICA).* Kyoto, Japon, 2004.
[8] Gruber, T. R. A translation approach to portable ontologies. *Knowledge Acquisition*, 5(2), p. 199-220, 1993.
[9] Kojs, J., Serafin, S. et C. Chafe. Cyberinstruments via Physical Modeling Synthesis: Compositional Applications. *Leonardo Music Journal*, 17, 2007.
[10] Luciani, A. Ordinateur, geste réel, matière simulée. *Les cinq sens de la création : Art, technologie, sensorialité*. Ed. par Borillo M. t A. Sauvageot, Champ Vallon, Seyssel, 1996.
[11] Smith III, J. O. Physical modeling synthesis update *Computer Music Journal*, 20(2), p. 44–56, 1996.
[12] Tache, O. et C. Cadoz. Generation of Complex Sound Sequences Using Physical Models with Dynamical Structures. *Proceedings of the International Computer Music Conference.* New Orleans, USA, p. 1-8, 2006.
[13] Tache, O. *Conception d’un Instrumentarium pour la création musicale à l’aide des modèles physiques CORDIS-ANIMA*. PhD Thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, October 2008.
[14] Välimäki, V., Pakarinen, J., Erkut, C. et M. Karjalainen. Discrete-time modelling of musical instruments. *Reports On Progress In Physics*, 69(1), p. 1-78, 2005
[15] *A Roadmap for Sound and Music Computing, Version 1.0*. Ed. par Serra, X., Leman, M. and G. Widmer. The S2S^2 Consortium, p. 53, April 2007. `http://www.soundandmusiccomputing.org`