

---

# Lutherie virtuelle et interaction instrumentale

## Une approche physique de l'instrument de musique numérique

James Leonard<sup>1</sup>, Claude Cadoz<sup>1,2</sup>, Nicolas Castagne<sup>2</sup>,  
Annie Luciani<sup>1,2</sup>

1. Laboratoire Ingénierie de la Création Artistique (ICA)
2. Association pour la Création et la Recherche d'Outils d'Expression (ACROE)  
46 Avenue Félix Viallet, 38000 Grenoble, France  
leonard@imag.fr, cadoz@imag.fr, luciani@imag.fr, castagne@imag.fr

---

*RÉSUMÉ.* Cet article propose une réflexion autour du geste instrumental musical, de sa nature physique et de sa place dans le monde numérique. Nous abordons dans un premier temps la différence fondamentale du lien geste-son entre instruments acoustiques et instruments musicaux numériques, le premier cas étant régi par un couplage physique dynamique et le second par le traitement et la transmission d'informations et de signaux. Nous présentons ensuite une approche permettant le couplage physique avec des instruments virtuels simulés, s'appuyant sur le formalisme de modélisation physique CORDIS-ANIMA et l'utilisation de systèmes à retour d'effort. En particulier nous développons les problématiques de cohabitation et de couplage physique dans le cadre de réseaux physiques multifréquence. Pour terminer, nous présentons des exemples d'instruments virtuels créés de cette manière et discutons de l'intérêt de créer un tel lien physique à l'instrument dans le cadre numérique.

*ABSTRACT.* This paper proposes a reflexion concerning instrumental musical gestures, their nature and how they transpose into the digital world. First, we discuss the fundamental difference in the gesture-sound relationship between acoustic instruments and digital musical instruments, the former being linked by a dynamical physical coupling, the latter by transmission and processing of information and signals. We then present an approach allowing experiencing physical coupling with virtual instruments, using the CORDIS-ANIMA physical modelling system and force feedback devices. In particular, we elaborate on the cohabitation and physical coupling of physical models simulated at different rates. Finally, we present examples of virtual instruments developed with this approach and discuss the relevance of creating such a physical connexion to instruments in the digital context.

*MOTS-CLÉS :* modélisation physique, synthèse sonore, geste instrumental, couplage physique, systèmes à retour d'effort, simulation multifréquence, instruments virtuels, instruments musicaux numériques.

*KEYWORDS: physical modelling, sound synthesis, instrumental gesture, physical coupling, force feedback devices, multirate simulations, virtual instruments, digital musical instruments.*

DOI:10.3166/TS.32.391-416 © Lavoisier 2015

### **Extended abstract**

To this day, the formalization and design of Digital Musical is a major axis for Computer Music research, yielding numerous new interfaces for interactive sound control. Such instruments are generally characterized the capture, processing and mapping of information acquired from a gestural interface towards sound synthesis parameters. Conversely, acoustical musical instruments are based on a physical energetic relationship between the musician's gestures and the sound produced by vibratory deformations of the instrument. This difference fundamentally changes the way we interact with digital instruments and could possibly account for a somewhat limited usage outside the academic world.

Physical coupling with virtual musical instruments can be obtained under certain conditions, by using physical modeling techniques to design the instrument and force feedback transducers to allow mechanical interaction with it. We present such a system based on the CORDIS-ANIMA formalism, with which we can design instruments respecting a bidirectional physical gesture-sound relationship. Generally speaking, musical instruments exhibit two temporal dynamics, which are physically coupled: non-vibrating gestural sections and vibrating acoustic sections. We discuss the main difficulties of the digital implementation this multi-rate scenario:

- 1) The choice of up-sampling and down-sampling operators which are consistent with the reactive one-step delay coupling of position and force variables inside CORDIS-ANIMA physical networks. Delay-less zero order operators are found to be preferable despite the reconstructed signals presenting harmonic distortion.
- 2) Low-pass filtering techniques for band-limiting and addressing the above distortion in the context of CORDIS-ANIMA. We implement these filters as physical models, passive mechanical systems that remain coherent with our physical coupling approach.

Addressing these questions allows designing multi-rate virtual instruments that support the primary function of musical instruments: energetically transposing a musical gesture (of relatively low bandwidth) into acoustical phenomena (of high bandwidth) via a non linear excitation mechanism. The MSCi (*Modeleur Simulateur Pour la Création Instrumentale*) modeling and simulation system supports this activity, allowing users to craft virtual musical instruments with CORDIS-ANIMA and then gesturally interact with them in real time using a force feedback device. Doing so, we benefit from the flexibility of physical modeling sound synthesis while maintaining an *instrumental* energetic link between musical gestures and sound.

## 1. Introduction : l'instrument traditionnel et l'instrument numérique

L'ordinateur occupe aujourd'hui une place prépondérante dans notre société. Il a profondément bouleversé et changé notre façon de travailler, communiquer et créer. Le monde musical ne fait pas exception, que ce soit dans le domaine de la musique populaire, dont la réalisation est aujourd'hui presque indissociable de l'outil informatique, ou dans les processus de création de nombreux compositeurs contemporains, qui exploitent l'outil informatique tant dans le cadre formel de la composition que dans l'élaboration de timbres et de sonorités par synthèse. Plus particulièrement, avec l'évolution technologique rapide des ordinateurs, presque toutes les techniques de synthèse du son peuvent désormais être implémentées et calculées en temps réel et pilotées à la volée par un utilisateur, par exemple en captant les gestes de ce dernier pour les convoier ensuite vers des paramètres du processus de synthèse.

On peut alors parler de tels systèmes comme de nouveaux instruments, propices à la création, à l'improvisation et dans certains cas à l'élaboration d'une réelle virtuosité. Toutefois, une question fondamentale se pose quant au lien qui se crée entre un musicien et un tel instrument musical numérique : est-il de même nature que le lien à un instrument mécanique réel, est-ce qu'il répond aux mêmes codes ? La question est complexe, d'autant que différentes techniques de synthèse comportent des paramètres de contrôle très différents, à la fois en nature et en quantité. Par ailleurs, la synthèse ouvre indéniablement des possibilités inouïes dans le contrôle des propriétés des timbres des sons tout comme dans leur agencement macro-structurel : il est légitime de se questionner sur la relation du musicien vis-à-vis de ces nouveaux processus sonores ainsi que sur la façon la plus pertinente de les contrôler.

Ce questionnement peut être déroulé jusqu'au terme même d'instrument musical : est-ce qu'un processus de synthèse contrôlé en temps réel est un instrument, au sens où celui-ci serait, comme dans l'instrument mécanique, le support d'un corps-à-corps instrumentiste/instrument ? Peut-on regrouper sous le même chapeau instruments mécaniques et instruments numériques ? Est-ce que calquer le contrôle de processus de synthèse sur une imitation de la manipulation des instruments mécaniques a du sens, et est-ce la seule option ?

### 1.1. La relation instrumentale

Avant de parler plus avant de la nature d'un instrument, il est nécessaire d'aborder le geste, et la manière dont il permet à l'homme d'interagir avec son environnement. Le geste étant par nature simultanément porteur d'action et de perception, nous regrouperons ces deux propriétés sous le terme de « canal gestuel », suivant la typologie de Cadoz (1994). Cette typologie catégorise les fonctions du canal gestuel en trois parties distinctes complémentaires :

– La fonction *sémiotique* : elle a pour but d'émettre de l'information, de l'être humain vers le monde extérieur. A titre d'exemple on peut citer la langue des signes, ou bien les gestes d'un chef d'orchestre, porteurs d'information pour les musiciens.

– La fonction *épistémique* : elle a pour objectif de transmettre de l'information du monde vers l'être humain. Elle est le support d'une connaissance de l'environnement externe à l'homme. Elle est portée par les sens extéroceptifs tels que la vue et l'ouïe ainsi que par le sens tactilo-kinesthésique.

– La fonction *ergotique* : elle intervient lorsque l'homme interagit physiquement avec le monde qui l'entoure, en le transformant et en dépensant de l'énergie. Cette fonction diffère de manière fondamentale avec les fonctions sémiotique et épistémique, car elle a pour résultat une transformation matérielle physique de l'environnement et non une finalité informationnelle. Cette relation énergétique ne s'opère pas par une superposition des fonctionnalités épistémique et sémiotique, puisque celles-ci sont purement informationnelles.

Le *geste instrumental musical*, effectué par un musicien sur un instrument de musique (un objet mécanique du monde extérieur) fait intervenir ces trois fonctions : lors de l'exercice instrumental musical, l'homme émet de l'information (par exemple le son d'un instrument musical destiné à un spectateur récepteur) ; il en reçoit de la part de l'instrument (son poids, sa résistance, etc.) ; il met en vibration un objet mécanique et pour ce faire, il échange avec lui de l'énergie. C'est la conjonction des trois fonctions du geste instrumental musical qui en fait sa complexité et sa subtilité. Néanmoins, il est important de noter que la fonction ergotique du geste, ou autrement dit le couplage physique de deux systèmes dynamiques – l'humain et l'instrument – est un facteur clé pour la richesse expressive d'un instrument musical (Cadoz, 94), le son produit par ce dernier étant la conséquence directe d'une circulation d'une énergie physique et de sa transformation mécanique depuis le geste musical jusqu'aux vibrations sonores.

### **1.2. L'instrument de musique numérique**

Revenons à présent sur le contrôle interactif de processus de synthèse numériques. Ceux-ci sont regroupés sous le terme *Digital Musical Instrument* (DMI), soit instrument de musique numérique (Wanderley et Depalle, 2004). Celui-ci est composé d'une partie dédiée au contrôle gestuel, permettant la captation de certaines caractéristiques du geste du musicien, d'une unité de production sonore et d'un processus de gestion de correspondances entre les deux, appelée *mapping*, au cours de laquelle est effectuée une affectation de signaux d'entrée (qui peuvent être continus ou de nature événementielle) aux paramètres de synthèse.

Le *mapping* peut être de nature plus ou moins complexe, allant de correspondances strictement bijectives (un signal contrôlant un paramètre de synthèse) à des schémas quelconques, « plusieurs-vers-un », « un-vers-plusieurs », « plusieurs-vers-plusieurs » (la combinaison de plusieurs signaux d'entrées agit sur un ou plusieurs paramètres). Cette architecture sépare la manipulation gestuelle d'un instrument numérique de son unité de production sonore. Dans les instruments

acoustiques, au contraire, les deux entités sont liées par la physique même de ceux-ci. De ce fait, les instruments numériques permettent de dépasser les limites inhérentes à la manipulation des instruments acoustiques, offrant des possibilités d'association inédites entre gestes et sons.

Toutefois cette liberté dans l'association du geste au son n'est pas sans poser de nouvelles questions, aussi bien scientifiques qu'artistiques : l'étape de *mapping* est un facteur déterminant dans les DMI, puisqu'elle affecte fondamentalement la capacité de jeu et l'expressivité de ces derniers (Hunt *et al.*, 2003). Depuis ces quinze dernières années, de nombreux travaux ont été dédiés à la recherche de stratégies de *mapping* optimales et générales dans les instruments numériques (Hunt *et al.*, 2000). Il y est notamment question de la recherche d'un optimum entre facilité de jeu et expressivité/subtilité de l'instrument, impliquant une meilleure compréhension des relations entre difficulté technique, apprentissage instrumental et possibilités créatrices (Wanderley et Depalle, 2004). Il en découle que cette dissociation nette entre le geste et le son est à double tranchant : d'une part, elle ouvre les portes de nouveaux paradigmes de contrôle qui, selon l'effet désiré, peuvent s'avérer plus porteurs qu'un mimétisme de la relation mécanique geste-son ; mais, d'autre part, la mise en œuvre d'une association porteuse de sens entre un geste d'entrée et la variation d'une propriété acoustique est un problème entièrement nouveau, propre aux instruments numériques et qui demeure à ce jour une source de difficultés, nécessitant bien souvent des stratégies complexes pour obtenir un contrôle suffisamment fin de l'instrument (Kvifte, 2008).

Andy Hunt résume bien cette difficulté (2004) : *The mapping "layer" has never needed to be addressed directly before, as it has been inherently present in acoustic instruments courtesy of natural physical phenomena. Now that we have the ability to design instruments with separable controllers and sound sources, we need to explicitly design the connection between the two. This is turning out to be a non-trivial task.*<sup>1</sup>

Mais alors, qu'en est-il du statut des instruments de musique numériques ? D'après les constats ci-dessus, ils permettent bien de transposer des gestes humains à dynamique lente et non vibrante, dans le domaine sonore à dynamique rapide et vibrante : ceci est bien la fonction première d'un instrument de musique. En ce sens, ils relèvent tout à fait de l'appellation d'instrument. Cependant, un changement fondamental s'opère dans la façon dont le geste est lié au son : dans les instruments mécaniques, ce lien est assuré par le couplage physique homme/instrument et par l'échange d'énergie que ce couplage instaure, tandis que dans le cadre des instruments numériques fondés sur le *mapping* il s'effectue uniquement sur la transmission et le traitement d'informations.

---

1. Traduction proposée : La « couche » de *mapping* n'a jamais nécessité d'être directement adressée dans le passé, étant intrinsèquement présente dans les instruments acoustiques de par les phénomènes physiques naturels de ces derniers. Maintenant que nous avons la possibilité de concevoir des instruments avec des contrôleurs séparables de la source sonore, nous devons explicitement concevoir la connexion des deux. Ceci se révèle être une tâche non triviale.

Plusieurs auteurs (*cf.* Castagné *et al.*, 2004) soulignent l'effet de la rupture du couplage physique naturel entre l'espace des gestes et l'espace des sons, argumentant que l'étroite interaction qui s'établit entre un instrumentiste et son instrument dans la relation énergétique est un des fondements de la subtilité et l'expressivité des phénomènes sensoriels produits par les instruments mécaniques. Ceci laisse présager d'une perte essentielle lors du découpage en contrôleur/système de synthèse des instruments numériques, perte que l'on peut difficilement compenser ou reconstruire à partir de relations purement informationnelles entre gestes et son, aussi complexes soient-elles.

### ***1.3. Introduction d'une physicalité dans l'instrument numérique***

Un autre qualificatif pour des systèmes de synthèse sonore interactifs tel que ceux décrits ci-dessus est le terme d'instrument musical virtuel – *Virtual Musical Instrument* (Smith, 2004). Cette notion, un peu moins générale que celle d'instrument musical numérique – *Digital Musical Instrument*, a souvent été utilisée pour désigner des instruments numériques visant à reproduire avec une certaine ressemblance un instrument du monde réel. Nous désignerons ici instrument musical virtuel tout instrument numérique visant à simuler de façon convaincante un instrument physiquement plausible, qu'il ait ou non une référence réelle.

Cette vision prône plutôt un retour vers une interaction de nature physique avec un instrument qui serait partiellement contenu dans l'ordinateur, plutôt qu'un schéma de contrôle-synthèse découplé. La couche de *mapping* se présente alors comme une manière de faire un lien physique, tel que c'est le cas dans les instruments acoustiques, entre les outils de contrôle gestuel (capteurs et actuateurs et leur processus de traitement associés), et les méthodes numériques de production sonore de l'instrument.

Se pose alors la question de comment créer une situation qui présenterait les propriétés essentielles de la manipulation d'un objet réel, autrement dit comment renouer avec cette notion de « physicalité » de l'instrument et du lien musicien/instrument, sans toutefois perdre en généralité en restreignant l'univers des possibles du numérique à une copie instrumentale. À cette fin, de nombreux systèmes font appel 1) à des processus de synthèse sonore par modélisation physique permettant de concevoir des instruments virtuels qui répondent à des lois physiques et 2) à des systèmes à retour d'effort, dits haptiques, pour l'interaction gestuelle avec de tels instruments virtuels.

Du point de vue des usages des instruments musicaux numériques, nous pouvons remarquer que la majorité d'entre eux restent ancrés dans le schéma classique de contrôle/synthèse par le biais du *mapping*, même lorsqu'ils font appel aux technologies de modélisation haptique et d'interaction à retour d'effort. Le lien homme-instrument demeure très différent du cas des instruments mécaniques :

– De nombreuses techniques de modélisation physique permettent désormais un réalisme et une richesse sonore tout à fait convaincants, tels que la synthèse par guide d'onde (Smith, 1992), la synthèse modale (Adrien, 1991), la synthèse par

modèles masse-interaction (Cadoz *et al.*, 1993) ou encore les schémas à différences finies (Rabenstein *et al.*, 2007) ou à éléments finis (Bilbao *et al.*, 2013). Toutefois, l'usage le plus commun de ces outils est de les utiliser comme unité de synthèse sonore et de les piloter via des données entrantes contrôlant des paramètres physiques de la synthèse, selon une logique entrée/sortie, autrement dit en « boucle ouverte ».

– De même, de nombreux systèmes intègrent du retour d'effort dans le contrôleur gestuel, permettant à l'utilisateur d'interagir avec un modèle mécanique local (Sinclair et Wanderley, 2009) ou encore de renseigner haptiquement de propriétés liées à la synthèse sonore (Marshall et Wanderley, 2006 ; Berdahl *et al.*, 2009a). Toutefois, ce sont majoritairement des données issus de capteurs réels (sur l'interface gestuelle) ou virtuels (détection d'événements dans le modèle mécanique local) qui sont ensuite associées, librement vers des paramètres d'un moteur de synthèse qui peut être de nature physique ou bien purement mathématique. Ces méthodes sont conformes aux principes du mapping en ce sens qu'il n'y a pas de rebouclage du comportement de l'instrument vers le geste, via le contrôleur gestuel et que donc il n'y a pas de couplage énergétique entre la partie de l'instrument produisant le son et s'adressant à l'oreille et celle permettant l'exercice du geste et s'adressant au corps.

Ainsi, la communication entre les gestes de l'utilisateur (ou issus de son interaction avec un modèle mécanique local) et un processus de synthèse (qu'il soit physique ou non) est presque systématiquement de nature unidirectionnelle : c'est le geste qui pilote le son, selon une philosophie de contrôle-commande sans rétroaction mécanique. Par ailleurs, on remarque que dans les instruments numériques le terme *contrôle* de processus de synthèse est souvent utilisé plutôt que la notion d'*interaction* avec un instrument virtuel.

Cependant, un certain nombre de recherches œuvrent dans le but de la représentation fidèle d'une situation instrumentale complète avec un instrument virtuel modélisé physiquement (Sinclair et Scavone, 2009 ; Berdahl *et al.*, 2009b ; Florens, 2002). Cet objectif nécessite la mise en œuvre de formalismes et technologies de modélisation et simulation particulières, ainsi que de dispositifs haptiques performants couplés à des architectures de calcul spécifiques. Et avant tout, cette approche nécessite de considérer la *chaîne instrumentale* dans son ensemble – allant du geste du musicien jusqu'au modèle producteur de son et vice-versa – et de s'assurer qu'en tout point cette chaîne respecte les conditions nécessaires à la représentation du couplage physique.

Cet article présente la plateforme MSCI (*Modèleur Simulateur pour la Création Instrumentale*), résultat de nos recherches sur de tels systèmes de manipulation instrumentale d'instruments virtuels, alliant les fonctions ergotique, épistémique et sémiotique. Il s'agit d'un environnement permettant de modéliser des instruments musicaux virtuels, que ceux-ci soient inspirés par des instruments mécaniques existants ou non, qui respectent la physicalité de la chaîne instrumentale mécanique et ensuite de pouvoir simuler ces instruments en temps réel et d'interagir avec eux par le biais d'une interface à retour d'effort. L'utilisateur a donc un rôle double : à la fois celui de luthier, véritable concepteur d'instruments mécaniques virtuels, et celui

d'instrumentiste, qui apprend à jouer et joue de ces instruments et explore leur potentiel créatif et expressif. Dans la suite, nous discuterons des différents concepts et technologies mis en œuvre pour la création de cette plateforme, puis présenterons une problématique spécifique de traitement du signal qui se pose dans le cadre de réseaux physiques multifréquence.

## 2. La chaîne instrumentale et le contexte informatique

### 2.1. Une représentation de la chaîne instrumentale

Un schéma fonctionnel parfois employé (McIntyre *et al.*, 1983) pour représenter les instruments musicaux est présenté en figure 1. Dans celui-ci, une source d'énergie vient exciter par un processus non linéaire une structure vibrante, parfois appelée résonateur :

- La *source d'énergie* correspond au geste du musicien, qui peut être « à nu » ou bien transformée par un système mécanique. On peut par exemple citer le geste de percussion avec une baguette, ou bien un souffle pour les instruments à vent.

- Le *mécanisme d'excitation* comprend quand à lui nécessairement une composante non linéaire. Des exemples de mécanismes d'excitation sont la percussion de la corde par le marteau de piano, le pincement d'une corde, l'excitation du tuyau de la clarinette par l'anche, etc.

- Le *résonateur* est une structure vibrante, dont les propriétés mécaniques déterminent les caractéristiques du son, tels que les modes et l'amortissement. En première approche, le résonateur est souvent considéré comme étant linéaire, même si on constate de plus en plus que la richesse et la subtilité des instruments musicaux passe par un résonateur au moins faiblement non linéaire (Bilbao, 2014).

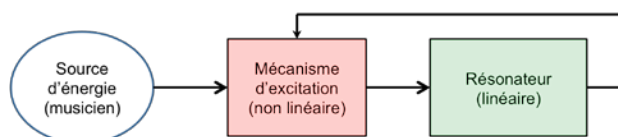


Figure 1. Un schéma fonctionnel possible d'un instrument musical (McIntyre *et al.*, 1983 ; Bilbao, 2014).

Cette représentation en blocs fonctionnels entrée/sortie met en avant une propriété de base de l'instrument de musique, qui consiste à transformer des phénomènes mécaniques non nécessairement vibrants en phénomènes mécaniques vibratoires sonores. Cette transformation, nécessairement non linéaire, conduit à identifier dans l'instrument une partie fonctionnelle usuellement appelé mécanisme d'excitation.

Dans cette représentation, la relation entre l'instrumentiste, identifié à la source d'énergie à gauche, et l'instrument est unidirectionnelle. Elle est donc basée sur



l'hypothèse que l'instrumentiste puisse être considéré comme une source d'énergie pure, dont le comportement mécanique ne dépend pas de la charge, i.e. que le comportement mécanique de l'instrumentiste n'est pas affecté par l'existence de l'instrument. Cette hypothèse peut être justifiée dans un certain nombre de cas, en particulier non musicaux, mais également dans certaines fonctionnalités de la relation instrumentale musicale, comme les fonctionnalités sémiotique ou épistémique. Cependant, dans le cas du geste ergotique d'excitation qui met en vibration une structure mécanique, cette hypothèse est limitative et ne peut expliquer des phénomènes d'interactions mécaniques complexes qui existent entre l'instrumentiste et son instrument. L'instrumentiste ne peut être réduit à une source d'énergie pure et l'instrument à une charge pure. Il est par conséquent nécessaire de considérer le couplage bidirectionnel physique entre l'homme, en tant que système actif source de l'énergie à comportement linéaire ou non linéaire non nécessairement vibrant et l'instrument, ce dernier pouvant passif non linéaire à comportement pour partie vibrant. Le schéma fonctionnel se transforme alors ainsi :

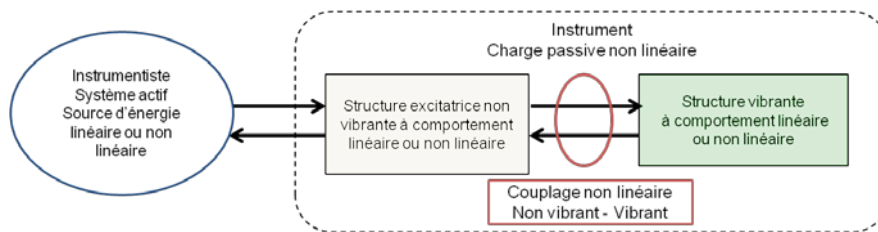


Figure 2. Schéma fonctionnel d'un instrument musical représentant le couplage physique ainsi que deux espaces dynamiques distincts

Ce schéma identifie : 1) les parties nécessairement actives sources d'énergie (l'instrumentiste) et les parties non nécessairement actives – de ce fait, non nécessairement sources d'énergie – (l'instrument) ; 2) la structuration fonctionnelle de l'instrument en deux parties qui sont reliées par un couplage physique vibrant – non vibrant, nécessairement non linéaire. Elle permet en outre d'enrichir chacune des sous-parties, non vibrantes ou vibrantes, qui peuvent être par exemple elles-mêmes, à comportement mécanique linéaire ou non linéaire (non-linéarités rhéologiques, non-linéarités géométriques, etc.). Ainsi la structure vibrante peut ne pas être uniquement un résonateur. De même, la structure excitatrice peut ne pas se réduire à un mécanisme d'excitation. Elle peut elle-même être composée de plusieurs fonctionnalités, telle que par exemple, la différentiation dans un mécanisme de piano, entre la partie interagissant avec l'instrumentiste, i.e. la touche de piano, et celle interagissant avec la structure vibrante, i.e. le marteau, les deux étant en relation par un mécanisme de simple ou double échappement.

Enfin, elle permet également d'adapter chaque maillon en fonction de sa bande passante utile, par exemple en considérant que les parties non vibrantes ont une bande passante de l'ordre de quelques kHz, alors que les parties vibrantes

productrices de son sont de l'ordre de quelques dizaines, voire centaines, de kHz. Quelles que soient la simplification ou la complexification de chacun de ces maillons, auquel peut conduire le processus de modélisation, le point essentiel est que la relation entre chacun d'eux, du geste humain au son, puisse être un couplage physique bilatéral.

## **2.2. Défis d'implémentation dans le cadre informatique**

L'implémentation d'instruments virtuels respectant intégralement cette chaîne nécessite de pouvoir représenter chaque maillon avec un formalisme énergétiquement cohérent et d'adresser les questions de couplage physique en plusieurs points :

– Tout d'abord, il s'agit d'intégrer la notion même de couplage physique dans une machine à calcul basée sur l'information et le signal : pour cela, nous présentons brièvement le formalisme masses-interactions CORDIS-ANIMA, créé par Claude Cadoz (1981) et qui permet de modéliser à l'aide de la physique newtonienne masses-interactions des objets virtuels et de les coupler entre eux. À partir de ce formalisme, de nombreux modèles de structures vibrantes et de mécanismes d'excitation, pouvant exhiber différentes formes de non linéarités rhéologiques ou géométriques, ont pu être développés, que nous ne présenterons pas ici.

– Il s'agit également d'assurer le couplage physique entre une simulation virtuelle calculée et un utilisateur du monde réel. Cela s'effectue par l'utilisation de systèmes de transduction gestuelle, tels que des systèmes électromécaniques à retour d'effort proposés par Florens *et al.* (2004), particulièrement adaptés aux gestes *instrumentaux musicaux*, en termes d'ergonomie et de performances dynamiques.

– Enfin, l'examen de la chaîne instrumentale tel que schématisé dans la figure 2, composée de parties couplées allant du geste au son, induit l'idée que ces différentes parties, du fait qu'elles assurent des fonctionnalités mécaniques différentes, puissent présenter des propriétés dynamiques différentes. Par exemple, les bandes passantes du geste à nu ou du geste instrumenté lors de la manipulation d'un objet matériel à déformation non audible sont de l'ordre de quelques centaines de Hz alors que les bandes passantes des parties vibrantes acoustiques sont de l'ordre de quelques dizaines de kHz. La structuration excitatrice est alors porteuse d'une non linéarité d'une seconde nature : non seulement elle couple des phénomènes non nécessairement audibles à des phénomènes audibles mais également des phénomènes à bande passante fréquentielle différente. On peut en effet admettre, sans trop limiter la structuration présentée dans la figure 2, que la partie gauche de la structure excitatrice est usuellement le siège de phénomènes dynamiques à plus basse fréquence de coupure que la structure vibrante. Par conséquent, la relation entre la structure excitatrice et la structure vibrante porte non seulement le couplage entre les parties acoustiquement vibrantes et celles qui ne le sont pas, mais aussi l'adaptation, également non linéaire entre des phénomènes à bandes passantes fréquentielles différentes, à minima une partie échantillonnable et calculable à une fréquence dite « basse » de l'ordre de la dynamique du geste et des mécanismes non

audibles et une autre échantillonnable et calculable à fréquence haute ou acoustique, car génératrice des comportements vibrants de l'instrument.

Les problématiques classiques de l'analyse, de la synthèse et du traitement des signaux doivent être abordées avec précaution, dans le contexte de simulation de systèmes en boucle fermée, axé sur la représentation du couplage physique, notamment en termes de maintien de la cohérence énergétique, de la stabilité des algorithmes numériques et des significations physiques des systèmes. En particulier, elle impose des contraintes de latence et de réactivité très importantes au niveau des calculs de chaque bloc et des échanges de signaux entre eux. Mais elle impacte également les processus de modélisation de couplages physiques multifréquences. Il s'agit donc d'un défi particulièrement important et nouveau, pour la modélisation de la chaîne instrumentale musicale telle que schématisée dans la figure 2, et plus spécifiquement pour le formalisme CORDIS-ANIMA, ainsi que pour les outils de modélisation et les architectures de simulation temps réel qui lui sont dédiés.

### 3. Le formalisme de modélisation et simulation physique CORDIS-ANIMA

CORDIS-ANIMA (Cadoz *et al.*, 1981, 1993) constitue la base fondatrice de recherches fondamentales, de développements technologiques et d'outils portant sur la création artistique numérique. Né dans les années 1980, ce formalisme modulaire permet de construire des objets physiques virtuels par la création de réseaux masses-interactions basés sur la physique Newtonienne, objets qui peuvent ensuite être simulés. CORDIS-ANIMA définit formellement deux types de modules :

- Les modules <MAT> ou matériels, dont le plus élémentaire représente une masse ponctuelle, dotée d'une position dans l'espace et d'un comportement inertiel.
- Les modules <LIA> qui représentent des interactions entre deux modules <MAT> pouvant être de nature élastique, visqueuse, non linéaire, etc. Un module <LIA> relie deux modules matériels et calcule des forces d'interaction en fonction des positions et vitesses respectives des modules matériels qu'ils connectent, forces qui s'appliquent de manière symétrique (égale avec signe opposé) sur chacun des modules matériels connectés.

CORDIS-ANIMA traduit la notion de couplage physique entre ses modules élémentaires par l'interdépendance de deux variables duales : la position, une variable *extensive* qui donne aux modules <MAT> une position spatiale et la force, variable *intensive* qui traduit le résultat d'interactions entre modules <MAT>. La simulation d'un réseau CORDIS-ANIMA consiste alors en une boucle fermée de calcul des positions de tous les modules <MAT> à partir des forces qui leurs sont fournis par tous les <LIA> puis le calcul de toutes les forces produites par les interactions <LIA> à partir des variables de positions et/ou de vitesses produites par tous les <MAT> qu'ils connectent. Ainsi, comme le montre la figure 3, un module MAT fournit une position à un module LIA qui lui est connecté et reçoit en retour une force de ce dernier, alors qu'un module <LIA> reçoit deux positions (ou deux vitesses) des deux modules <MAT> qu'il connecte et leur fournit à chacun une force opposée et de valeur égale.

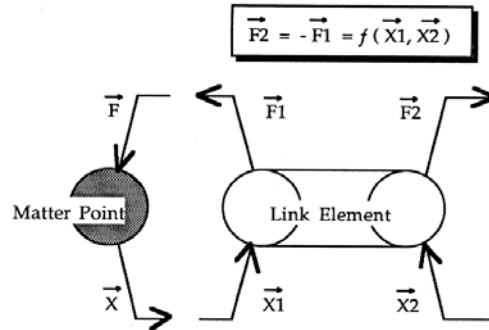


Figure 3. Connexion entre les modules <MAT> et <LIA> dans le formalisme CORDIS-ANIMA : circulation des positions et des forces

Plusieurs implémentations de CORDIS-ANIMA existent pour diverses notions de distances spatiales : unidimensionnel à distance scalaire, et 1D-2D-3D avec distances euclidiennes. Pour la synthèse sonore des mécanismes vibro-acoustiques, nous nous appuyons essentiellement sur une version unidimensionnelle à distance scalaire dans laquelle les modules <MAT> se déplacent selon un unique axe scalaire, celui des vibrations. Les modèles ainsi constitués sont des réseaux topologiques qui représentent les déformations vibratoires telles qu'elles apparaissent dans les instruments musicaux.

Pour des modèles producteurs de son, le modèle physique est simulé à bande passante acoustique, que nous appellerons « haute fréquence » dans la suite du texte (généralement 44.1 kHz) de sorte à représenter la bande passante des phénomènes vibratoires aéro-acoustiques auxquels l'homme est sensible. Les modèles non-vibrants, utilisant essentiellement des implémentations de CORDIS munies d'une spatialité 1D, 2D ou 3D à distance euclidienne sont simulés à fréquence plus basse, que nous appellerons ici « basse fréquence », de l'ordre de 1 à 10 kHz, correspondant à la plage de la dynamique du geste humain instrumenté, c'est à dire à celle de l'interaction gestuelle de l'humain avec un objet physique du monde réel.

De par sa conception formelle et son squelette de calcul qui couple positions et forces, CORDIS-ANIMA permet de simuler dans l'ordinateur le couplage physique entre objets, et ce au plus bas niveau des éléments atomiques eux-mêmes <MAT> et <LIA>. Ainsi, un objet virtuel comme des ensembles d'objets virtuels sont conçus comme des ensembles d'éléments <MAT> et <LIA>. Cela conduit à ce que tout objet ou ensemble ainsi construit, quelque soit sa structure et sa complexité, respectera, du niveau microscopique des éléments et au niveau macroscopique de l'ensemble, la bidirectionnalité caractéristique de la chaîne instrumentale.

#### 4. Couplage physique entre une simulation numérique et le monde réel : systèmes à retour d'effort

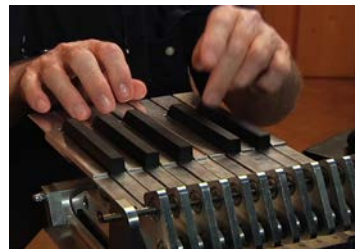
Les systèmes à retour d'effort ou *haptiques* permettent de coupler gestuellement un utilisateur à un objet distant, pouvant être de nature réelle ou simulée, en captant des informations sur les gestes de l'utilisateur et en lui exerçant des forces en retour. Pour cela, ils comportent des capteurs et actionneurs, permettant de connecter l'utilisateur à des flux de variables duales telles que la position et la force dans CORDIS-ANIMA.

Le *transducteur gestuel rétroactif* (TGR) est un dispositif à retour d'effort, dont le premier prototype remonte à (Florens, 1978). Il a été conçu spécifiquement pour répondre aux nécessités de la création artistique, notamment les arts instrumentaux tels que la musique et l'image animée. Son objectif premier est de restituer dans le cadre de la simulation les qualités dynamiques caractéristiques de l'interaction réelle entre un utilisateur et un objet physique. Par conséquent, les performances du système répondent aux besoins du couplage physique, en particulier dans le cas des gestes instrumentaux musicaux, nécessitant une grande bande passante dynamique ainsi qu'une force maximale exerçable élevée (jusqu'à 200 N pour le TGR). Par ailleurs, la conception modulaire en tranches motorisées (Florens *et al.*, 2004) permet un grand nombre de degrés de libertés qui peuvent être couplés par des effecteurs mécaniques spécifiques pour adapter la morphologie de l'interface à une variété de gestes musicaux.

Allié à des architectures synchrones de calculateurs permettant de simuler un modèle physique CORDIS-ANIMA en temps réel avec des latences très faibles et un niveau de réactivité très élevé, le TGR permet un pont énergétique entre l'utilisateur du monde réel et l'instrument virtuel : les deux sont dynamiquement couplés. Ainsi, ces technologies supportent et respectent pleinement la fonction ergotique du geste musical lors de l'interaction avec un instrument simulé dans l'ordinateur.



a) Un effecteur d'archet 2D



b) Système à 12 degrés de liberté avec morphologie piano

Figures 4 et 5 Transducteurs gestuels rétroactifs

## 5. Couplage physique multifréquence avec CORDIS-ANIMA

### 5.1. Introduction du problème

La problématique de couplage physique entre deux parties de modèle CORDIS-ANIMA échantillonnées et simulés à des fréquences différentes pose plusieurs questions fondamentales, notamment : (1) comment faire transiter les variables de flux duales de position et de force entre ces deux échantillonnages tout en étant le plus transparent possible pour le couplage physique entre les deux espaces simulés et (2) comment assurer une limitation de la bande passante des comportements physiques lorsqu'ils passent par exemple du domaine haute fréquence vers le domaine basse fréquence, sans laquelle des problèmes de repliement de spectre se produiront de part et d'autre de la frontière haute/basse fréquences.

À première vue, cette situation semble se résumer à un problème assez élémentaire de traitement de signal, faisant intervenir des opérateurs de sous-échantillonnage et de sur-échantillonnage classiques ainsi que des filtres numériques passe-bas pour garantir une limitation de la bande passante des signaux et ainsi se prémunir contre les problèmes d'aliasing associés.

Or le contexte de CORDIS-ANIMA impose une contrainte structurelle forte sur les opérateurs à choisir: il s'agit d'un système de simulation en boucle fermée dans laquelle les variables de position et de force sont couplées avec un unique pas de simulation et donc de délai unique et de la valeur d'un échantillon au maximum, entre toutes les entrées et toutes les sorties de tous les modules composant le modèle. Le comportement d'un réseau physique CORDIS-ANIMA est régi par cette interdépendance temporelle *au plus tôt* des positions et des forces à tout endroit du modèle.

Il en résulte que tout délai, supplémentaire à celui d'un seul pas de calcul strictement nécessaire aux algorithmes de discrétisation simplectiques d'intégration des systèmes d'équations différentielles résolvant numériquement l'ensemble des masses et des interactions dans CORDIS-ANIMA, et qui pourrait être introduit dans la boucle position-force au titre d'autres processus altère fondamentalement le comportement physique calculé et affecte considérablement la stabilité numérique de la simulation. Ceci limite fortement les possibilités d'utilisation de nombreux outils de rééchantillonnage et de filtrage numérique qui introduisent un retard entre le signal d'entrée et le signal de sortie. Ci-dessous, nous résumons une étude portant sur différents opérateurs inter-fréquence et présentons la solution adoptée.

### 5.2. Opérateurs de passage inter-fréquence dans CORDIS-ANIMA

Tout opérateur de sur-échantillonnage peut être caractérisé par deux critères fondamentaux : le délai qu'il introduit vis à vis du signal basse fréquence d'entrée et la distorsion harmonique (autrement dit la périodisation du spectre basse fréquence) que présente le signal haute fréquence reconstruit. À titre d'exemple, le reconstruteur de Shannon convolué sur un support de temps infini un signal

échantillonné par un sinus cardinal et reconstruit parfaitement le signal continu d'origine pour peu que sa bande passante initiale soit limitée à la fréquence de Nyquist. Il ne présente aucune distorsion harmonique mais un délai infini : c'est une idéalisation non implémentable. À l'inverse, des opérateurs d'ordre zéro tels que le sur-échantillonneur bloqueur n'introduisent aucun délai mais reconstruisent un signal fortement distordu.

### 5.2.1 Opérateurs inter-fréquence minimisant le critère de délai

Au vu des contraintes de latence imposées par la boucle fermée de simulation CORDIS-ANIMA, nous nous sommes intéressés à des opérateurs de passage entre les zones basse-fréquence et haute-fréquence élémentaires d'ordre zéro, minimisant le critère de délai. Ainsi nous avons pour la variable extensive de position les opérateurs suivants :

- Le sous-échantillonneur simple (position rapide vers lente)
- Le sur-échantillonneur bloqueur (position lente vers rapide)

Concernant la variable intensive de la force, les opérateurs sont choisis de sorte à concorder avec la nature circulante de celle-ci dans les réseaux CORDIS-ANIMA :

- Le sous échantillonneur accumulateur (force rapide vers lente)
- Le sur échantillonneur impulsionnel (force lente vers rapide)

Les deux types de connexions possibles avec ces opérateurs inter-fréquence sont donnés en figure 6, où les variables  $X$  et  $F$  désignent les positions et forces lentes, et  $x$  et  $f$  leurs homologues rapides.

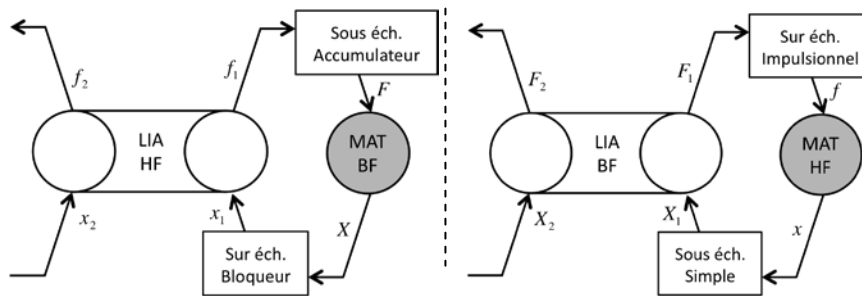


Figure 6. Les deux situations possibles de couplage inter-fréquence avec opérateurs minimisant le critère de délai

Ces opérateurs n'induisent pas de retard dans la boucle de simulation. Par ailleurs, il est possible de démontrer par le calcul qu'un modèle multifréquence ainsi connecté se comporte identiquement à un modèle équivalent entièrement simulé en basse fréquence du point de vue de la stabilité numérique, soit pour un oscillateur simple la condition limite sur les paramètres CORDIS-ANIMA d'inertie  $M$ , de

raideur  $K$  et de viscosité  $Z$  :  $4M > K + 2Z$  (1). Ce résultat se vérifie également expérimentalement.

Une conséquence cependant inévitable est que ces opérateurs sont mauvais du point de vue de la distorsion harmonique, générant sur les signaux reconstruits haute fréquence des phénomènes prononcés de périodisation du spectre autour de multiples de la fréquence basse. Pour que cette solution soit viable, il nous incombe alors de trouver une solution pour filtrer les composantes à haute fréquence de la distorsion harmonique.

### 5.2.2. Étude de rééchantillonneurs à délai

Un sur-échantillonneur par convolution de sinus cardinal de Shannon peut être approximé en choisissant un support temporel borné et en introduisant un retard dans la chaîne de traitement afin de rendre son calcul causal. Le signal de sortie  $X^*(n)$  aura un retard de  $N/2$ , où  $N$  représente le support de temps de la convolution, par rapport à  $X(n)$ . N'étant plus à support temporel infini, la reconstruction du signal initial est imparfaite, présentant de la distorsion harmonique.

Nous pouvons étudier ce type de reconstruction sur un modèle élémentaire d'oscillateur, composé d'une masse d'un ressort-frottement et d'un point fixe. La figure 7 montre le comportement oscillant en position d'un tel modèle simulé en basse fréquence et en haute fréquence, ainsi que le signal haute fréquence reconstruit par convolution des échantillons basse fréquence par un sinus cardinal sur une fenêtre de 40 échantillons. Le signal résultant présente un retard de 20 échantillons vis à vis du signal source, mais sa reconstruction est très bonne.

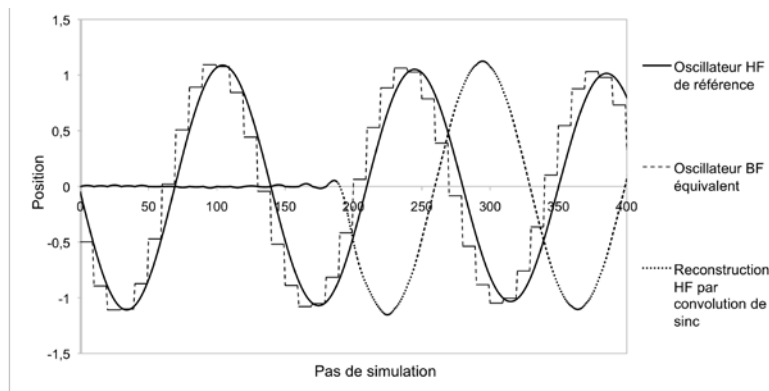


Figure 7. Reconstruction par convolution de sinus cardinal sur une fenêtre de 40 échantillons BF. Le signal HF est correctement reconstruit mais présente un retard

Toutefois ce type d'opérateur se révèle être inutilisable lorsque couplé à un réseau CORDIS-ANIMA tel que celui de la figure 8. Le retard induit sur la position haute-fréquence reconstruite réduit drastiquement la stabilité numérique du calcul de simulation. La figure 9 montre l'évolution d'un tel modèle en fonction de



l'utilisation ou non du sur-échantillonneur par sinus cardinal. Les paramètres physiques du modèle sont choisis de sorte à obtenir une raideur massique  $K/M$  totale sur la masse simulée à basse fréquence de 0.02 avec une faible viscosité, soit largement à l'intérieur du domaine de stabilité numérique dicté par la relation (1). Lorsque les opérateurs inter-fréquence sans délai sont utilisés, le modèle est stable et oscille avec un léger amortissement (courbe bleue), tandis qu'avec le rééchantillonneur à délai le modèle devient immédiatement instable, y compris pour de faibles retards introduits (3 échantillons BF pour la courbe rouge, 6 pour la courbe orange). L'instabilité introduite par le délai est irrécupérable. Ce résultat confirme l'impossibilité de résoudre ces problématiques d'échantillonnage de manière classique dans CORDIS-ANIMA, nous poussant alors vers des solutions alternatives.

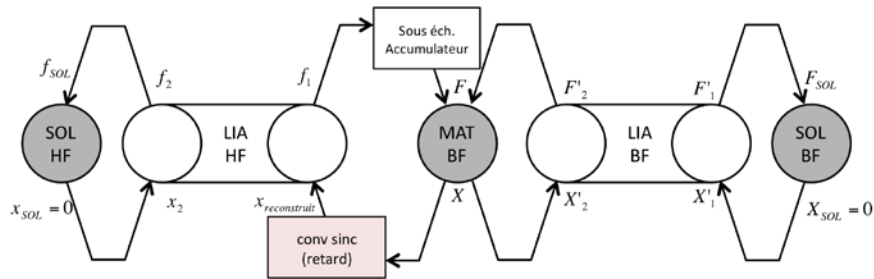


Figure 8. Intégration du sur-échantillonneur à délai dans la boucle de simulation CORDIS-ANIMA

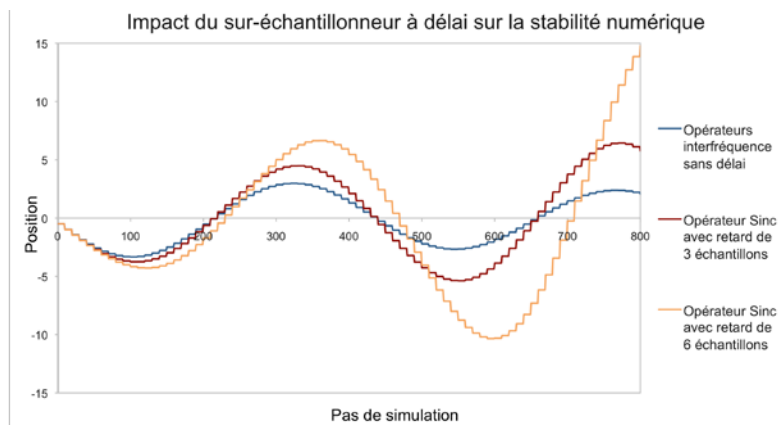


Figure 9. Instabilité numérique constatée lors de l'utilisation d'opérateurs inter-fréquence introduisant un délai dans la boucle de simulation

Notre solution s'appuie en conséquence sur les opérateurs inter-fréquence explicités en 5.2.1, qui n'altèrent pas la stabilité numérique ni le comportement

physique du réseau CORDIS. Toutefois, les signaux haute fréquence qu'ils reconstruisent sont pollués par de la distorsion harmonique qui s'avère très problématique si elle se propage jusqu'aux sections de modèle productrices de son.

### 5.3. Couplage inter-fréquence : mise en œuvre d'une structure physique filtrante

Heureusement, nous sommes mieux armés pour traiter la problématique du filtrage que celle du retard : les modèles CORDIS-ANIMA peuvent jouer un rôle filtrant d'eux-mêmes, du fait de leur comportement physique. Ainsi, un simple maillon RES-MAS constitue en lui-même un filtre passe-bas élémentaire du second ordre (*cf.* figure 10) dont les relations entre paramètres physiques et fonction de transfert peuvent être exprimées (Incerti, 1996). Entre autres, de tels filtres élémentaires ont déjà été utilisés dans des modèles physiques pour résoudre des problématiques de couplage au système haptique, dans le but de filtrer par modèle physique une partie du bruit présent sur les capteurs de positions (Leonard *et al.*, 2013) de ce dernier.

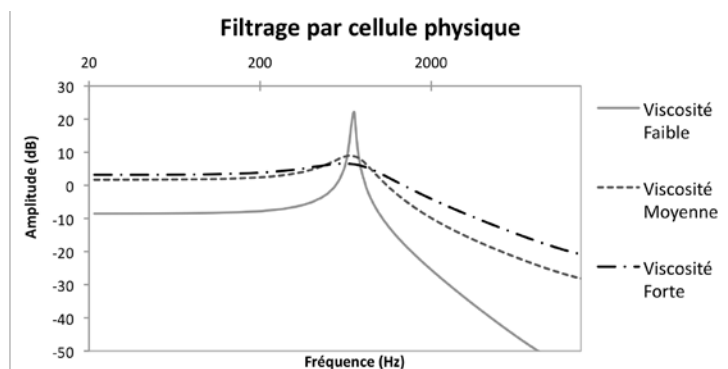


Figure 10. Réponse en fréquence d'un maillon REF-MAS élémentaire CORDIS-ANIMA en fonction de la variation du paramètre de viscosité

Par extension de cette même logique, il est donc tout à fait possible d'employer des modèles physiques CORDIS-ANIMA plus complexes à des fins de filtrage (Kontogeorgakopoulos et Cadoz, 2007), la fonction filtrante étant régie par le comportement de l'objet modélisé, donc par sa topologie et ses paramètres physiques. Il est alors question de concevoir des modèles physiques dont le comportement propre joue un rôle de filtre passe-bas qui réponde au mieux à nos besoins : un comportement le plus transparent possible dans la bande passante basse fréquence et coupant avant la fréquence de Nyquist de celle-ci, de façon à filtrer les périodisations du spectre générées lors du passage vers le domaine haute fréquence.

Ces filtres peuvent se modéliser sous la forme de lignes de propagation (des chapelets de masses et d'interactions viscoélastiques) avec une distribution inhomogène du paramètre de viscosité. Les paramètres de fréquence de coupure, de

raideur de coupure et de régularité de la bande passante d'un tel filtre sont alors déterminés par les paramètres physiques du modèle. Nous arrivons ainsi à de véritables sections de modèle physique ayant pour vocation de limiter la bande passante des signaux qui les traversent, d'effectuer un filtrage passe-bas bidirectionnel afin (1) d'éliminer la distorsion harmonique générée par les opérateurs de passage et (2) de servir de filtre anti-repliement pour la circulation vers le domaine basse fréquence. La formalisation analytique de ces filtres est en cours et prévue pour une publication prochaine.

La chaîne instrumentale « numérique » complète telle que nous l'avons implémentée se présente alors comme en figure 11, en explicitant les opérateurs inter-fréquence ainsi qu'une section de modèle physique passif qui s'intercale entre la zone de transition de fréquence et l'interaction non linéaire de couplage à la structure vibrante. Ainsi la pollution des signaux de position et de force par la distorsion harmonique est traitée et ne se propage pas aux parties sonores du modèle.

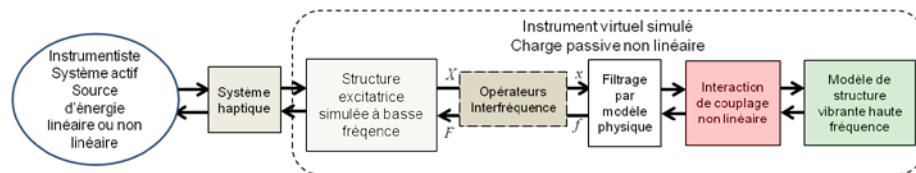


Figure 11. Implémentation de la chaîne instrumentale « numérique »

Ayant ainsi adressé les principaux questionnements relatifs à la création d'une chaîne instrumentale numérique qui représente fidèlement les aspects énergétiques du geste musical, il est désormais question de mettre en œuvre un environnement de lutherie numérique pour la modélisation de tels instruments, ainsi que d'implémenter une architecture de calcul apte à supporter leur simulation temps réel à retour d'effort.

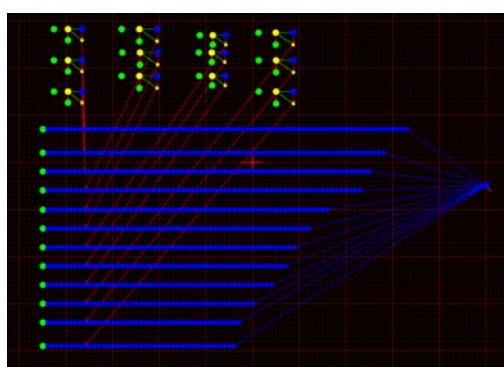
## 6. Système de lutherie d'instruments virtuels et architecture de simulation

Un enjeu majeur de ce travail est l'ouverture de ces technologies à tous types de musiciens et compositeurs. À cette fin, un nouvel environnement de lutherie d'instruments a été créé (cf. figure 12) pour la plateforme MSCl, dérivant du logiciel GENESIS (Castagné *et al.*, 2009) de modélisation physique pour la création musicale. Deux nouveautés majeures ont été introduites dans cet environnement :

– Les modèles physiques sont répartis en parties « haute fréquence » et en « basse fréquence ». L'utilisateur peut ainsi décider de modéliser une partie de son instrument virtuel dans un domaine fréquentiel ou l'autre, en fonction de son rôle (vibrant ou non) et de la bande passante requise pour le couplage physique. Ainsi, des sections de modèle représentant la structure excitatrice liée au geste sont typiquement modélisées en basse fréquence, tandis que les structures vibrantes

seront modélisées à fréquence audio. L'utilisateur dispose d'un ensemble de fonctionnalités pour transposer des modules d'un domaine fréquentiel vers l'autre, notamment en compensant les paramètres physiques afin de conserver le comportement simulé.

– De nouvelles fonctionnalités permettent d'intégrer les modules associés au TGR directement dans les modèles MSCl, sous la forme de modules MAT (le TGR recevant des forces et fournissant des positions). Des outils dédiés permettent d'ajuster l'impédance mécanique entre le monde réel et celui de la simulation et sont décrits dans (Leonard *et al.*, 2013).



*Figure 12. Modèle d'instrument de cordes percütées représenté dans l'environnement de lutherie d'instruments virtuels MSCl*

La simulation de tels modèles avec les contraintes de réactivité connues de l'haptique (Castet et Florens, 2008) requiert une architecture de calcul spécifique, respectant des critères de synchronisme et de puissance de calcul. Notre simulateur est actuellement implémenté sur un système de la société Concurrent Computer<sup>2</sup> dotée d'un Système d'Exploitation Linux Temps Réel (dit RTOS) nommé RedHawk. Une telle architecture a déjà été adoptée par le passé pour des modèles non musicaux tridimensionnels, simulés à fréquence plus basse (Castet et Florens, 2008). Le calcul du modèle physique est séparé en deux zones de fréquence et le dispositif haptique communique de manière synchrone avec la partie basse fréquence du modèle, dont la fréquence peut être choisie par l'utilisateur, généralement entre 1 et 10 kHz.

Cette nouvelle architecture permet le calcul de modèles de grande taille en temps réel, de l'ordre de 6 000 modules CORDIS-ANIMA, soit environ 50 fois plus de puissance de calcul que l'architecture précédente, dans laquelle le calcul de simulation était exécuté sur un processeur DSP (Leonard *et al.*, 2013). Il nous est de fait possible d'expérimenter la modélisation et simulation de grands modèles,

---

2. [www.ccur.com](http://www.ccur.com)

comportant des systèmes mécaniques complexes et des structures vibrantes de grande taille, telles que les plaques et membranes. Par ailleurs, le calcul de simulation est actuellement exécuté sur un unique cœur de calcul d'un processeur de la machine : nous étudions actuellement la possibilité de répartir la simulation physique sur plusieurs cœurs afin de paralléliser son exécution et gagner ainsi d'avantage en puissance.

## **7. Modélisation et expérimentation d'instruments musicaux virtuels**

La majeure partie des modèles créés avec notre plateforme peut être classée dans les catégories traditionnelles d'instruments musicaux : instruments à percussion, à pincement, à oscillation entretenue (frottement), etc. En effet, même si les instruments modélisés ne réfèrent généralement pas à un instrument réel « tel quel » et peuvent même être très éloignés de toute référence connue, leurs systèmes d'excitation sont basés sur des fonctionnements analogues à ceux des instruments réels avec une mimique du système mécanique et de l'interaction qui se produit. Nous profitons par ailleurs pleinement de cette mixture possible entre mécanismes inspirés de la réalité instrumentale et liberté de modélisation physique pour créer des instruments insolites ou impossibles à réaliser mécaniquement dans le monde réel, tels que des plaques pincées ou frottées, des instruments à percussion produisant des sonorités plus proches des instruments à vent et bien d'autres qui jouent avec la flexibilité de la modélisation physique tout en maintenant une chaîne instrumentale ergotique. Ci-dessous, nous présentons quelques modèles et techniques de modélisation résultant de notre activité de création et d'exploration avec la plateforme MSCl.

### **7.1. Instruments à percussion balistique**

Les instruments musicaux à percussion comptent parmi les plus courants et sont, incidemment, la catégorie la plus simple à modéliser avec la plateforme MSCl. D'une manière générale, ces instruments permettent au musicien de rentrer en collision avec une structure vibrante (une corde, une membrane, etc.), potentiellement par le biais d'outils tels que la baguette du percussionniste ou le marteau du piano. Nous présentons ici un instrument basé sur une réplique quelque peu simplifiée de la mécanique du piano :

- Chaque touche du système haptique est couplée avec un modèle simplifié de la mécanique du piano, comprenant l'inertie de la touche, sa course, le marteau, l'attrape et l'étouffoir. Cette section de conditionnement mécanique du geste est simulée en basse fréquence. Seule la masse représentant le marteau appartient au domaine haute fréquence.

- Le mouvement du marteau associé à chaque touche est de nature balistique. Lors de l'appui sur cette dernière il est projeté avec une certaine vitesse et percute par une interaction de collision élastique une structure vibrante. Du fait de ce phénomène balistique, le marteau n'est pas jamais couplé simultanément à la section

mécanique du geste et à la structure vibrante : il ne requiert donc aucune solution de filtrage de distorsion harmonique, car l'instrument opère en lui-même un découplage entre la partie mécanique du geste et la section acoustique.

La figure 12 présente un tel modèle de percussion balistique : la partie haute du modèle est composée de 12 systèmes mécaniques de percussion mentionnés ci-dessus, chacun étant connecté à une touche du système à retour d'effort. Les marteaux de ces mécaniques sont ensuite connectés par des liaisons de collision élastique (des butées) à un ensemble de cordes, dont les paramètres physiques peuvent être ajustés de sorte à approcher une panoplie de comportements sonores différents.

### 7.2. Instruments à pincement et à frottement

Des instruments excités par phénomènes de pincement (tels que le plectre venant pincer une corde de guitare) ou par frottement (par exemple l'excitation entretenue d'un violon avec un archet) peuvent également être modélisés avec la plateforme. Dans ce cas de figure, le couplage physique entre le modèle mécanique à basse fréquence et le modèle de la structure vibrante est plus prononcé. Par conséquent, les parasites de distorsion harmonique doivent être traités, faute de quoi cette distorsion sera injectée dans la structure vibrante et polluera le son résultant. Nous faisons alors appel aux structures physiques filtrantes abordées précédemment, sous la forme de lignes de propagation venant s'intercaler entre le dernier élément basse fréquence et l'interaction d'excitation non linéaire de la structure vibrante. Les interactions de frottement et de pincement sont modélisées par des interactions linéaires par morceaux : un profil force/position pour le pincement où l'utilisateur tend la corde en la tirant en un point (cf. figure 13) puis la relâche ensuite, et force/vélocité pour le frottement, dont le profil détermine les conditions de vitesse nécessaires pour la mise en oscillation de la structure vibrante.

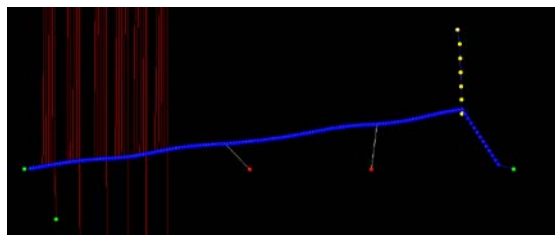


Figure 13. Visualisation d'un modèle de corde pendant l'interaction de pincement

Parmi les modèles faisant usage de ces interactions d'excitation, nous présentons ci-dessous un modèle de corde, conçu pour la manipulation à deux mains. Le musicien peut exciter la corde par pincement avec une touche du système haptique ; il peut également effectuer des gestes de modification avec d'autres touches qui

servent à bloquer la corde à l'aide d'un système de frettes, raccourcissant sa longueur vibrante et changeant ainsi la hauteur du son produit. La disposition des frettes est calibrée en fonction de l'amplitude des vibrations de la corde, de sorte à ce qu'elle puisse vibrer librement, rentrant parfois en légère collision avec les frettes lors d'excitation à très grande amplitude, ce qui a pour effet un « grésillement » sonore caractéristique.

Ce modèle se prête à une variété de styles de jeu : la version la plus classique consiste à utiliser la main gauche pour sélectionner la note voulue, puis de pincer la corde simultanément ou un certain temps après. Il est aussi possible d'explorer d'autres gestes guitaristiques, tels que la technique du *hammer-on* où la main gauche peut être utilisée pour changer de note sur une corde déjà excitée sans recourir à un nouveau geste de pincement (incidemment, le geste de modification ré-excite légèrement la corde). Il est même possible d'exploiter les harmoniques naturelles de la corde, en venant l'étouffer très délicatement par un appui léger, sans la bloquer sur une frette. Le spectrogramme de la figure 14 montre un exemple d'une phase de jeu mettant en œuvre ces différentes techniques.

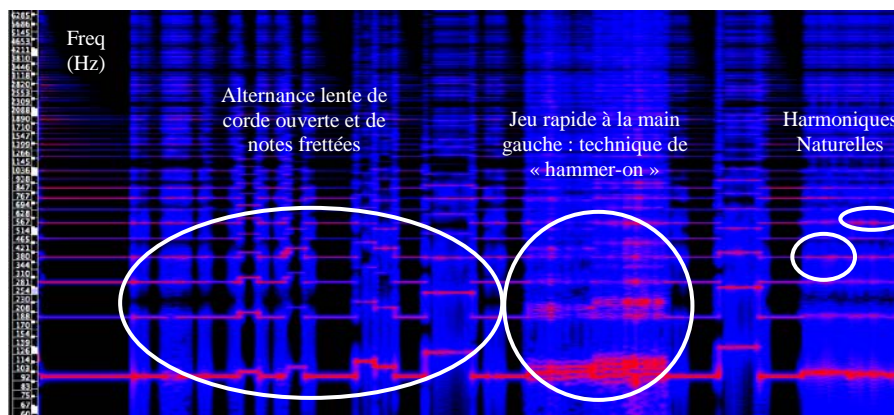


Figure 14. Spectrogramme de jeu sur le modèle de corde pincée et frettée, montrant plusieurs types de jeu : classique (frette et pincement simultanés), une phase en « hammer-on » (fretage sans pincement) et une phase d'harmoniques naturelles (pincement avec un léger étouffement de la corde en des points précis)

## 8. Conclusions et perspectives

Cet article a proposé une réflexion sur le rôle des nouveaux instruments de musique numériques, qui constituent aujourd'hui un champ d'étude majeur dans le domaine de l'informatique musicale. Nous avons souligné la différence fondamentale entre les instruments numériques, qui mettent en œuvre la captation et le traitement d'informations pour contrôler un processus de synthèse à l'aide de contrôleurs gestuels, et les instruments mécaniques traditionnels basés sur une

interaction énergétique à caractère ergotique. Dans le cadre numérique il est possible de concevoir des instruments virtuels qui répondent au même fonctionnement physique que les instruments acoustiques, à la même *chaîne instrumentale*, en s'appuyant sur des techniques et concepts de modélisation physique et en employant des dispositifs à retour d'effort, capables de représenter une situation de couplage physique entre un utilisateur et un objet virtuel simulé.

Dans ce contexte, des problématiques telles que le couplage physique de sections échantillonnées à des fréquences différentes engendrent des difficultés particulières, entre autres du fait d'une incompatibilité de nature entre l'approche classique de traitement du signal et les contraintes de *boucle fermée* du formalisme CORDIS-ANIMA. En réponse à cette problématique, nous avons opté pour des opérateurs de passage inter-fréquence à délai nul, qui préservent le comportement physique simulé par les modèles, et adressons les problématiques de distorsion harmonique et d'aliasing par des méthodes de filtrage par modèle physique.

Cette approche nous permet de concevoir dans le cadre numérique des instruments virtuels respectant intégralement la physicalité bidirectionnelle de la chaîne instrumentale. De par ce couplage physique complet, du geste au son, ces instruments présentent une grande sensibilité aux nuances et à la dynamique des gestes instrumentaux musicaux et peuvent être porteurs, à nos yeux, d'une expressivité résultante similaire et comparable à celle des instruments acoustiques, tout en bénéficiant de la panoplie des nouveaux espaces sonores rendus possibles par l'ordinateur et en particulier par la synthèse sonore par modélisation physique.

## Bibliographie

- Adrien J. M. (1991). The missing link: Modal synthesis. *In Representations of musical signals*, MIT Press, p. 269-298.
- Berdahl E., Niemeyer G. et Smith J.O. (2009a). Using Haptics to Assist Performers in Making Gestures to a Musical Instrument. *Proceedings of NIME'09*, Pittsburgh, PA, p. 177-182.
- Berdahl E., Niemeyer G., Smith J.O. (2009b). Using haptic devices to interface directly with digital waveguide-based musical instruments. *Proceedings of NIME'09*. 2009, Pittsburgh, PA, p. 183-186.
- Bilbao S. (2014). The Changing Picture of Nonlinearity in Musical Instruments: Modeling and Simulation. *Proceedings of the International Symposium on Musical Acoustics*. Le Mans, France, 11 July 2014.
- Bilbao S., Hamilton B., Torin A., Webb C., Graham P., Gray A., & Perry J. (2013, June). Large scale physical modeling sound synthesis. *Proceedings of the Stockholm music acoustic conference (SMAC2013)*, Stockholm, p. 593-600.
- Cadoz C., Luciani A. & Florens J.L. (1981). Synthèse musicale par simulation des mécanismes instrumentaux. *Transducteurs Gestuels Rétroactifs pour l'étude du jeu instrumental. Revue d'Acoustique N° 59*, p. 279-292. Paris.



- Cadoz C., Luciani A., Florens J.L. (1993). CORDIS-ANIMA: A Modeling and Simulation System for Sound and Image Synthesis: The General Formalism. *Computer Music Journal*, vol. 17, n° 1. p. 19-29.
- Cadoz C. (1994). Le geste canal de communication homme/machine : la communication "instrumentale". *Technique et Science Informatiques*, 1994, vol. 13, p. 31-61.
- Castagné N., Cadoz C., Allaoui A., Tache O. (2009). G3: GENESIS Software Environment Update. *Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC'09)*, p. 407-410.
- Castagne N., Cadoz C., Florens J. L., Luciani A. (2004). Haptics in Computer Music: a Paradigm Shift. *Proceedings of EuroHaptics 2004*.
- Castet J., & Florens J. L. (2008). A virtual reality simulator based on haptic hard constraints. *In Haptics: Perception, Devices and Scenarios*, Springer Berlin Heidelberg, p. 918-923.
- Florens J-L. (1978). *Coupleur gestuel retroactif pour la commande et le controle de sons synthetises en temps-reel*. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Florens J.L. (2002). Real time Bowed String Synthesis with Force Feedback Gesture. *Acta Acustica*, Mus. 06, vol. 88.
- Florens J.L., Luciani A., Castagne N., Cadoz C. (2004). ERGOS: a Multi-degrees of Freedom and Versatile Force Feedback Panoply. *Proceedings of Eurohaptics 2004*, Germany, p. 356-360.
- Hunt A., Kirk R. (2000). Mapping strategies for musical performance. *Trends in Gestural Control of Music*. M. Battier and M. Wanderley (eds.), p. 71-93. Editions IRCAM.
- Hunt A., Wanderley M. M., Paradis M. (2003). The importance of parameter mapping in electronic instrument design. *Journal of New Music Research*, 32(4), p. 429-440.
- Incerti E. (1996). *Synthèse de sons par modélisation physique de structures vibrantes. Application à la création musicale par ordinateur*. Thèse INPG Grenoble.
- Kontogeorgakopoulos A., & Cadoz C. (2007). Filtering within the Framework of Mass-Interaction Physical Modeling and of Haptic Gestural Interaction. *In 10th International Conference on Digital Audio Effects 2007*, p. 319-325.
- Kvifte T. (2008). On the description of mapping structures. *Journal of New Music Research* 37.4, p. 353-362.
- Leonard J., Castagné N., Cadoz C., Florens J.L. (2013). Interactive Physical Design and Haptic Playing of Virtual Musical Instruments. *Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC'13)*, Perth, Australia.
- Marshall M.T. & Wanderley M.M. (2006). Vibrotactile feedback in digital musical instruments. *Proceedings of NIME'06. 2006*, p. 226-229.
- McIntyre M., Schumacher R., & Woodhouse J. (1983). On the oscillations of musical instruments. *J. Acoust. Soc. Am.*, 74(5), p. 1325-1345.
- Rabenstein R., Petrusch S., Sarti A., De Sanctis G., Erkut C., & Karjalainen M. (2007). Blocked-based physical modeling for digital sound synthesis. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 24(2), p. 42-54.

- Sinclair S., Wanderley M.M. (2009). A Run Time Programmable Simulator to Enable Multi-Modal Interaction with Rigid Body Systems. *Interacting with Computers*, vol. 21. p. 54-63.
- Sinclair S., Scavone G. (2009). Audio-haptic interaction with the digital waveguide bowed string. *Proceedings of the International Computer Music Conference (2009)*.
- Smith J. O. (1992). Physical Modeling Using Digital Waveguides. *Computer Music Journal*, 16(4). p. 74-91.
- Smith J.O. (2004). Virtual acoustic musical instruments: review and update. *Journal of New Music Research*. Vol 33, n° 3. p. 283-304.
- Wanderley M.M. & Depalle P. (2004). Gestural control of sound synthesis. *Proceedings of the IEEE* 92.4, p. 632-644.

Article soumis le 28/02/2015

Accepté le 17/09/2015