Le modèle physique, métaphore pour la création musicale

Claude Cadoz

▶ **To cite this version:**

Claude Cadoz. Le modèle physique, métaphore pour la création musicale. Journées d'informatique musicale 2002, 2002, Marseille, France. pp.11. hal-00910501

HAL Id: hal-00910501
https://hal.science/hal-00910501

Submitted on 1 Apr 2014

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.

Le Modèle Physique, métaphore pour la création musicale

Claude Cadoz

ACROE – ICA

Ministère de la Culture et de la Communication
Institut National Polytechnique de Grenoble
Université Joseph Fourier
email: Claude.Cadoz@imag.fr

Résumé

Cet article présente une pièce musicale de 290 secondes, pico..TERA*, *engendrée d'un seul tenant, sans post-traitement ni montage, par un modèle physique CORDIS-ANIMA. A partir de ce travail, on montre que le modèle physique particulaire n'est pas seulement un outil de synthèse de sons, mais qu'il permet de développer le processus de création musicale dans sa totalité, de la microstructure à la macrostructure. Partant des éléments utilisés dans la pièce, on dégage les principes qui font du modèle physique particulaire un paradigme général pour la « construction » musicale.*

1 Préambule

Si on considère le terme « composer » dans son étymologie stricte (poser ensemble), la « com—position » n'est qu'un des modes du processus de création. Une structure musicale est faite d'entités mises ensembles, soit par juxtaposition libre soit par application d'un processus (règle abstraite, processus physique, mécanique, électronique, algorithmique, dynamique gestuelle, etc.). La nature des entités n'est pas nécessairement uniforme : écrivant une partition, on manipule des symboles graphiques représentant des « valeurs musicales », jouant d'un instrument, on articule des gestes et l'on produit des phénomènes sonores, donnant les entrées d'un algorithme de synthèse, on manipule des données et l'on contrôle des propriétés du signal, pratiquant le « montage direct » (*direct to disk*), on manipule des signaux numériques, etc. Les entités peuvent à leur tour être issues de processus (physique vibratoire d'un instrument, algorithme de synthèse, … s'il s'agit des sons) ou d'un agencement libre de ses sous-parties (montage de portions de signal par exemple). La juxtaposition et la génération peuvent être appliquées en négatif : on peut décomposer un son en découpant ou filtrant son signal, on peut aussi en chercher les paramètres génériques pour un paradigme de synthèse donné. Enfin, les processus de génération eux-mêmes peuvent être objets de composition, en eux-mêmes (en assemblant les fonctions qui les constituent), et entre eux.

Que l'on compose les éléments d'un processus de génération ou les les entités qu'il génère, il s'agit toujours de composition, c'est-à-dire du processus où le concepteur se place en responsable ultime de ce qui relie les choses ensemble. Mais d'une part, la taille (l'échelle et la complexité), la nature et l'imbrication des entités, à la même échelle ou entre les échelles, au sein d'une même catégorie ou entre catégories, peuvent être variées et en particulier, à un niveau donné et pour une nature définie des entités (prenons l'exemple d'une structure harmonique et contrapuntique traditionnelle), la juxtaposition libre et l'engendrement par règles peuvent cohabiter et nécessiter d'être pensés et pratiqués dans le même cadre. D'autre part, au niveau le plus élémentaire, qui dépend à la fois de la technique employée et du point de vue d'où l'on se place, les deux formes peuvent également cohabiter : lorsque l'on compose notes à notes un accord ou une mélodie, un processus générateur est déjà présent en amont ; c'est celui qui permet d'engendrer les notes elles-mêmes si l'on recourt pour cela à un instrumentarium réel. La « com-position » est en fait l'un des pôles de la « construction », l'autre étant la « génération » dans le sens très large (générique) de la fourniture, à l'aide d'un processus conceptuel ou matériel, d'un ensemble de données à partir d'un ensemble de données plus petit.

---

* créée le 15 novembre 2001 à Grenoble, lors du concert des RICA (Rencontres internationales informatique et creation artistique).

C'est à ce titre que l'on préférera, bien que cet article entende montrer que le modèle physique permet aussi de « composer », parler ici de « construction » musicale.

2 pico..TERA – *ou la complicité des échelles*

Cette pièce a été construite à l'aide du logiciel CORDIS-ANIMA[1] et de son interface utilisateur GENESIS[2] dans son application temps-différé. On en rappelle ici les concepts, limités à ceux qui ont été utilisés dans la pièce.

2.1 CORDIS-ANIMA et GENESIS

CORDIS-ANIMA est un langage qui propose de modéliser et simuler des « objets physiques » comme des réseaux dont les nœuds sont des algorithmes de simulation d'éléments matériels ponctuels (par exemple des masses) et les liens des algorithmes de simulation d'interactions entre ces éléments (par exemple des interactions viscoélastiques linéaires ou toute interaction physique non-linéaire).

GENESIS est l'interface graphique qui permet de créer et expérimenter aisément ces réseaux, appelés modèles, à des fins de création sonore et musicale, et de créer des signaux sonores (mono-, stéréo- ou quadriphoniques) de n'importe quelle durée, à partir de ces modèles. Un modèle peut être de complexité quelconque (comportant plusieurs milliers d'éléments[3]). Pour la pièce, on a utilisé exclusivement les 7 éléments de base décrits ci-après :

L'élément **MAS**, simulation d'une masse ponctuelle se déplaçant dans un espace unidimensionnel (axe OX), caractérisée par un paramètre M correspondant à son inertie. On peut lui affecter des « conditions initiales », position et vitesse (X0, V0). Son algorithme, comme tous ceux qui entrent dans la catégorie des « éléments matériels » de CORDIS-ANIMA, calcule à chaque pas de temps une position X(n) en fonction de la somme des forces qui lui sont données en entrée et des deux positions précédentes.

L'élément **SOL** est une MAS d'inertie infinie, donc fixe, à qui l'on peut donner une position (initiale et constante donc).

L'élément **REF** est une interaction viscoélastique, combinaison de deux sous-éléments **FRO et RES** (RESsort et FROttement), également utilisables séparément, installée entre deux éléments matériels et calculant à leur intention deux forces de signes contraires à partir, respectivement, de leurs différences de positions et de vitesses et d'un coefficient d'élasticité K et d'un coefficient de viscosité Z.

L'élément **CEL** (CELlule) encapsule en un seul module, pour de simples raisons d'économie de représentation, la configuration fréquente SOL, REF et MAS.

Seuls deux modules non-linéaires de la panoplie CORDIS-ANIMA ont été utilisés dans la pièce :

Le module **BUT** (BUTée) qui est une liaison REF asymétrique : orienté d'un premier élément à un second, il simule un lien REF actif seulement quand la position (X2) du second est inférieure à la position (X1) du premier, augmentée d'un seuil (S). Ce module est le moyen élémentaire de simuler les collisions entre particules.

Le module **LNL** (Liaison Non Linéaire) permet de définir des interactions non-linéaires par la description (graphique et/ou algébrique) des caractéristiques $F(\Delta X)$ et $F(\Delta V)$, où ΔX et ΔV sont respectivement les positions et vitesses relatives des deux éléments. Il est utilisé par exemple pour la simulation des plectres, frottements d'archet, anches, etc.

Le dernier module, **SOX** (Sortie de position X) permet d'affecter les mouvements d'un, deux ou quatre éléments (auxquels il est connecté), à un, deux ou quatre haut-parleurs.

---

[1] Cadoz (C), Luciani (A) & Florens (JL), 1993. "CORDIS-ANIMA : a Modeling and Simulation System for Sound and Image Synthesis- The General Formalism", CMJ Vol 17-1 spring 1993.

[2] Cadoz (C), 1996. L'interface GENESIS pour la création musicale par modèle physique –ICMC 1996 – Banff – Canada.
Cadoz (C), 1999. "Sound, Music and Image Creation with Physical Model, 1999. The CORDIS & GENESIS computer tools from ACROE. DAFx 99. Trondheim, Norway. Dec. 1999.
Castagné (N), 2002. Thèse ATIAM (à paraître) – INPG, Grenoble 2002.

[3] Environ 5000 dans la pièce.

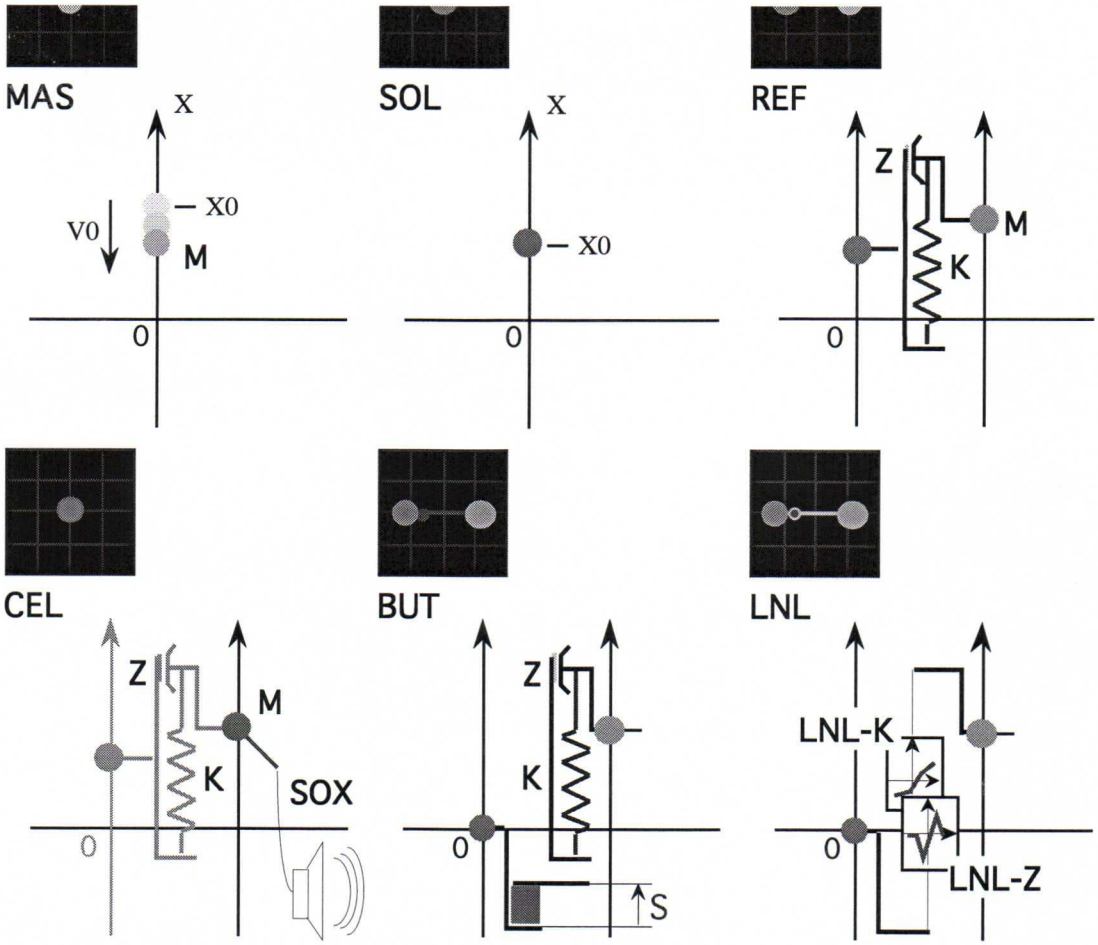


Figure 1 –les 7 éléments de base

2.2 Les composants de la pièce

La pièce est générée par un seul modèle complexe, un « orchestre », constitué d'un ensemble de structures instrumentales, « d'instrumentistes » et de « chefs » virtuels assemblés et interagissant de diverses manières dans un seul environnement (une « pièce »). On décrit ci-après, ces protagonistes.

Les structures instrumentales

Un instrument, en CORDIS-ANIMA, est constitué de Structures Vibrantes (VS) qui peuvent être libres, attachées à des points fixes, fixées à des « tables de résonance » directement ou par l'intermédiaire de « chevalets », et qui peuvent être « jouées » par des « instrumentistes ».

Les Structures Vibrantes

Cesont des ensembles de MAS et/ou de CEL reliées par des REF, BUT ou LNL, qui peuvent être attachées à un ou plusieurs SOL représentant leurs « conditions aux bords ». Leur forme générale est un réseau où chaque élément (nœuds et liens) est caractérisé par son type et ses paramètres. Les propriétés intrinsèques d'une SV dépendent de ses deux caractérisations : la structure du réseau et les valeurs des paramètres. GENESIS offre un ensemble de moyens élaborés pour éditer les deux. Les grands ensembles d'éléments peuvent être gérés par des outils de génération de macro-structure, de définition et d'édition de macro paramètres. Un module d'analyse et « d'accordage » permet d'identifier tous les modes vibratoires d'une structure linéaire et de transposer son spectre de manière à fixer l'une de ses composantes à une valeur prédéfinie. Les paramètres K et Z du réseau s'adaptant alors automatiquement.

Une forme de base pour la SV est la ligne (chapelet de MAS-REF), qu'il est possible d'accorder à n'importe quelle valeur et de « faire sonner » de manière très réaliste comme une corde en la fixant à ses deux extrémités. Mais dans la pièce, on a laissé de côté ce genre de structures communes pour mener une investigation plus authentique de l'univers sonore de CORDIS-ANIMA. On a adopté une approche pragmatique et systématique centrée sur les propriétés « topologiques » des réseaux linéaires et cherché à comprendre et exploiter leur intérêt propre plutôt que de viser un résultat sonore préconçu. Ce faisant, on a été amené à découvrir des espaces timbriques aux propriétés originales, à

l'écoute des sons individuels, mais surtout dans le potentiel d'assemblage de ces derniers (ce point sera repris plus loin).

Parmi les diverses formes topologiques étudiées, trois seulement ont été retenues pour constituer le « matériau de base » : la plus élémentaire (la CELlule), l'ANNEAU et le TRIANGLE (fig. 2).

Les propriétés musicales (en élément singulier et en combinaison) du dernier, fixé en deux de ses sommets, qui ne correspond ni du point de vue spectral ni du point de vue de sa forme physique, à un objet connu, sont relativement fascinantes (exemple sonore N°1).

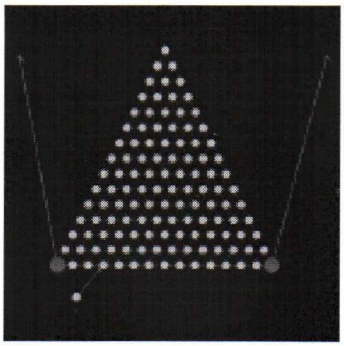


Figure 2 –TRIANGLE

Particules dans une boîte – la métaphore du « maracas »

On peut penser la matière sonore en tant que continuum. En CORDIS-ANIMA, cela se traduit par l'existence, au sein d'une SV monolithique (d'un seul tenant) par le fait que toutes les particules sont reliées au tout par des éléments de type REF. Mais en utilisant sans préjugé tous les liens disponibles dans le formalisme, on peut envisager de remplacer les REF par des butées (BUT), qui introduisent, au moins pour la moitié de l'espace d'interaction, une discontinuité franche, une coupure. En remplaçant ainsi tous les REF d'une « corde » fixée à ses deux extrémités, on réalise l'équivalent d'une « boîte » unidimensionnelle renfermant des particules qui s'entrechoquent entre voisines. Quand le nombre de particules ainsi encloses est supérieur à 3, leurs mouvements deviennent erratiques. En termes de signaux, ce procédé simple permet d'engendrer des signaux aléatoires, des bruits. D'un point de vue pratique, une correspondance perceptuelle intéressante peut être établie entre une structure monolithique et son dual « granularisé » en remplaçant tous ses REF par des BUT : le temps d'amortissement des mouvements est comparable dans les deux cas et déterminé par la valeur du paramètre Z (dans REF ou dans BUT) ; le centre de gravité spectral de la structure monolithique et de son dual granularisé est également comparable. En fixant la valeur de K dans la seconde, on agit sur la coloration du bruit. Par référence au maracas, qui est physiquement très proche de cette « boîte de particules » correctement dimensionnée, on a pris l'habitude d'appeler « maracassage » l'opération qui consiste à remplacer tout ou partie des REF d'une structure monolithique par des BUT. Les variétés sonores obtenues par ce procédé sont très riches et faciles à contrôler.

Dans la pièce, on a utilisé un tel principe pour engendrer des « sons de vent ». Plus précisément, on a implémenté un modèle constitué de deux tels « maracas » imbriqués : un premier niveau correspondant à quelques (5 à 8) particules liées par butées et enchâssées entre deux points fixes, un second niveau correspondant à substituer à chacune de ces particules un second « maracas » constitué exactement sur le même modèle, mais avec d'autres constantes de temps. Par ce moyen, on a pu engendrer un son bruité comportant deux échelles de fluctuations aléatoires : une au niveau audio (son bruité) et l'autre à un niveau sub-audio, produisant des fluctuations de l'énergie du signal à l'échelle des variations dynamiques macro temporelles (bourrasques de vent). Le « vent » obtenu peut alors être utilisé en lui-même ou bien « souffler » par l'intermédiaire d'un module de frottement FRO, sur une structure vibrante comme le TRIANGLE (figure 3), (exemple sonore N°2).

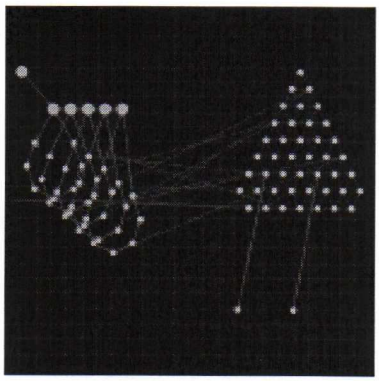


Figure 3 – Vent, Maracas et Triangle

Chevalets et tables de résonance

Ils permettent de constituer un instrument complet à partir des SV. Dans le monde réel, ces deux éléments jouent en effet un rôle important : la table de résonance réalise une adaptation d'impédance nécessaire à la transmission énergétique du phénomène sonore à l'environnement aérien. Moyennant ce service, la table ajoute en contrepartie sa contribution (en termes de théorie du signal, un filtrage et des résonances spécifiques) ; le chevalet, quant à lui est d'une part un moyen de relier la SV à la table, d'autre part de le faire éventuellement pour plusieurs SV à la même table.

Une manière simple et efficace de modéliser un chevalet et de remplacer les points fixes de la SV par des CEL(lules) dont les paramètres sont spécifiquement définis : une inertie très grande (100 fois plus que pour la SV par exemple), qui la rend presque inamovible à l'échelle des mouvements de la SV, une valeur de K maximum (tout en restant dans les limites de stabilité) de façon à conférer à l'oscillateur correspondant une fréquence de mode maximum. Le paramètre Z doit alors être fixé à ce que l'on appelle la « valeur critique » c'est-à-dire celle qui fait qu'en oscillation libre, l'oscillateur effectue une seule alternance avant d'être complètement amorti. En procédant ainsi, on définit en fait un filtre passe-bas du second ordre. Mais surtout, en attachant plusieurs SV au même « chevalet », on réalise la sommation de leurs vibrations à ce point. Le chevalet, en CORDIS-ANIMA, est le pendant dans le contexte modèle physique, de la sommation des signaux dans l'approche modèle de signal. Avec une importante différence, cependant : deux structures vibrantes attachées à une table par le même chevalet seront, de façon plus ou moins forte déterminée par l'inertie du chevalet, couplées. Elles peuvent interagir. Les vibrations de l'une pourront alors répondre « en sympathie » à celles de l'autre. Dans ce contexte, le tout est plus que la somme des parties et, bien sûr, au niveau de la richesse et du réalisme du son, ceci est tout à fait pertinent. Nous avons par exemple réalisé par ce principe, le phénomène de double décroissance des sons de piano (exemple sonore 3).

En ce qui concerne la table de résonance, ce peut être n'importe quelle structure (monolithique ou non) du type des structures vibrantes, avec simplement un changement d'échelle global la mettant dans les objets à inertie globale d'un ordre plus grand que la SV. Ses propriétés de résonance pourront être définies à volonté sur la même base que les propriétés modales des SV[4].

Ecouter les instruments

Il est possible d'écouter un instrument (quand il vibre) en envoyant les mouvements de l'un (de deux ou de quatre) de ses éléments sur un (deux ou quatre) haut-parleurs à l'aide des modules SOX. Ces éléments peuvent être placés (comme avec un micro de contact) sur la structure vibrante elle-même, au niveau des chevalets ou à celui de la table. On pourrait en toute rigueur modéliser également la pièce (air et parois) dans laquelle se trouvent les instruments, à l'aide du nombre de particules et d'interaction nécessaire. Pour la puissance actuelle des machines, ceci reste encore très coûteux. Dans la pièce (et pour les usages courants) on a pris un raccourci scandaleux mais très efficace, qui consiste simplement à assimiler la propagation à une interaction par viscosité : une liaison FRO(tement) est alors introduite entre les points d'écoute voulus des divers instruments et un (deux ou quatre) chevalets. En prenant le signal sonore au niveau de ces derniers, tout se passe comme si les chevalets étaient installés sur les membranes des haut-parleurs. Le coefficient de viscosité est choisi très faible de manière à ne pas modifier sensiblement les conditions d'amortissement des sons. C'est tellement rudimentaire qu'il n'y a aucune chance (ni prétention) de modéliser les aspects de propagation, réflexion, rayonnement des instruments. Mais c'est une manière extrêmement facile de superposer et pondérer les contributions d'un nombre quelconque d'instruments dans une même « pièce ». Leurs intensités respectives seront en effet contrôlées par les valeurs respectives des paramètres Z.

Un artifice encore plus osé (et encore moins physique) permet de résoudre le problème de l'écoute des SV sans point fixe (qui peuvent, comme c'est le cas de l'anneau, être intéressantes) qui ont une propension à se promener dans l'espace dès lors qu'on les excite. Il suffit en effet de mettre deux éléments de frottement comme

[4] Rappelons que les propriétés modales des structures vibrantes sont indépendantes de l'échelle des valeurs des paramètres physiques : en multipliant tous les paramètres d'une SV par le même nombre, celle-ci conserve intégralement toutes ses propriétés spectrales et temporelles.

dans le cas précédent, reliant deux de ses points différents à un même chevalet et de donner à ces frottements des coefficients opposés (Z et –Z) de sorte que la composante continue du déplacement s'élimine.

Jouer des instruments

En donnant une position initiale et/ou une vitesse initiale non nulles à l'un des points d'une SV, on la mettra en vibration. Elle retournera à son état de repos en fonction de ses coefficients d'amortissement. Mais c'est une façon fruste de jouer car tous les instruments ainsi sollicités se manifesteront tous au même moment, au départ de la pièce et jusqu'à leurs fins propres. Dans le contexte temps-différé de cette application de CORDIS-ANIMA, il n'est malheureusement pas possible de jouer réellement de ces instruments. Qu'à cela ne tienne ! Nous allons « simuler » les instrumentistes. Avec beaucoup d'excuses vis-à-vis des instrumentistes qui ne sont certes pas réductibles à de vulgaires modèles physiques, on peut toutefois tenter de simuler les plus simples de leurs comportements physiques à l'aide d'un modèle convenable. On décrit maintenant ce second type de métaphores utilisé dans la construction musicale à l'aide de GENESIS : l'instrumentiste virtuel.

Pour introduire ce dernier il faut un composant supplémentaire, ambigu, qui peut être vu soit comme partie de l'instrument, soit comme extension de l'instrumentiste : l'excitateur. Il correspond par exemple à la baguette de percussion ou à l'archet de violon ou à tout autre intermédiaire matériel. Sa fonction est de transmettre l'énergie du geste instrumental à l'instrument.

L'excitateur

Considérant que l'instrumentiste sera modélisé par un réseau CORDIS, le plus simple est d'envisager l'interaction entre deux MAS appartenant respectivement à l'un et à l'autre. Dans la mesure où leurs évolutions seront par nature différentes (celles de l'instrumentiste dans une bande de fréquence allant de 0 à environ 20Hz au maximum, celle de l'instrument de 20Hz à 20KHz), pour qu'un transfert d'énergie ait lieu entre les deux, il est nécessaire que la loi de leur interaction soit non-linéaire. Dans le monde réel, ceci correspond aux catégories fondamentales d'excitations, par percussion, pincement, raclement, secouements, frottement d'archet, soufflement d'embouchure, etc. Nous avons étudié et exploité depuis un certain temps chacune de ces catégories[5]. Pour la pièce, seulement deux cas simples ont été mis en œuvre : la percussion (réalisée à l'aide d'un module BUT) et le pincement (réalisé à l'aide d'un module LNL). La qualité du phénomène de percussion est entièrement déterminée, lorsque la masse du percuteur est inférieure ou voisine de celle du percuté, par la fréquence du mode propre de l'oscillateur constitué par la masse du percuteur et le ressort de liaison pendant la phase de contact percuteur-percuté[6].

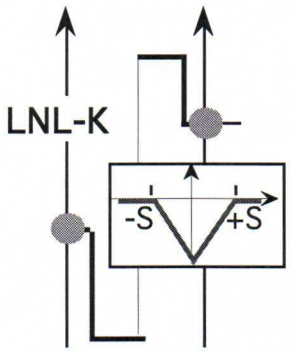


Figure 4 – Plectre modélisé avec un LNL-K

Le pincement, réalisé à l'aide du module LNL (figure 4), fait appel à une caractéristique F(ΔX) qui ne produit aucune interaction lorsque les MAS reliées sont distantes d'une valeur ΔX supérieure à un seuil (positif et négatif) qui correspond au maximum de déformation qu'un plectre peut avoir avant de franchir la corde, une valeur maximale lorsque les deux MAS sont à la même position, et une force décroissant linéairement de cette valeur max à 0 quand ΔX varie de 0 à la valeur du seuil. Bien que simple également, ce modèle permet de produire les actions de pincement naturelles et de restituer avec de riches variantes les phénomènes de micro rebonds (et les effets acoustiques correspondants) quand la SV et le plectre interagissent.

L'instrumentiste

L'instrumentiste le plus simple peut être représenté par une MAS se déplaçant depuis une certaine distance, sur son axe propre, en direction de l'instrument. Si l'élément de liaison est une BUT(ée), (percussion), la MAS atteindra la SV, restera en contact le temps d'une négociation d'énergie, puis repartira d'où elle est venue,

---

[5] Florens (JL) & Cadoz (C), 1990. "Modèles et simulations en temps réel de cordes frottées", 1er Congrès Français d'Acoustique - SFA - Editions de Physique - Lyon Avril 1990.

[6] Fourcade (P) & Cadoz (C) 2001. « Physical Modeling for Sound Synthesis with Particle – Interaction Networks : Study of the Percussion Phenomena and Design of generic rules for Percussions ». ICMC 2001. Cuba.
Fourcade (P), 2001. « Etude et simulation des phénomènes percussifs dans les instruments de musique » - Thèse de l'INPG.

laissant la SV terminer son travail seule. Si la liaison est le « plectreLNL », la MAS atteindra la SV, lui donnera au passage une petite charge d'énergie et poursuivra son chemin dans la même direction.

Ces deux cas peuvent être compris comme des gestes instrumentaux élémentaires. Selon ce point de vue, on peut définir les premières bases d'un langage gestuel exprimé en modèle physique. Un « quantum gestuel » peut alors être défini par :

- un quantum de mouvement q=M*V0
- un moment d'action, défini comme le temps mis par la MAS pour atteindre la SV, Ta=V0/XO

Ces « instrumentistes » peuvent être aussi nombreux qu'on le souhaite, indépendants, et peuvent « jouer » sur n'importe quelle structure en n'importe lequel de ses points.

Définie ici à partir d'exemples simples, cette approche peut être généralisée en un concept formel : dans le contexte modèle physique particulaire, les événements élémentaires peuvent être entièrement représentés par un ensemble de particules :

- possédant un quantum de mouvement,
- placées à une certaine distance,
- agissant en un point spécifique de « l'orchestre »,

ces données pouvant être quelconques sur toute la durée d'une pièce.

Dans GENESIS, ces bases sont celles d'un langage qui permet de construire une « partition gestuelle ».

Instrumentistes évolués

Il est évidemment hors de question de modéliser un instrumentiste réel. Toutefois, on peut perfectionner le vocabulaire gestuel dans le cadre de cette approche métaphorique. Le paradigme masse-interaction n'est en effet pas réservé à la production sonore. Il permet de modéliser tout phénomène dynamique produit par des objets en interaction. La position, le mouvement, la vitesse, l'inertie, l'élasticité, la viscosité et la non-linéarité sont des états et des propriétés attribuables à une grande variété d'entités (même dans le domaine du vivant, et non seulement d'un point de vue métaphorique). On peut alors utiliser ces concepts pour créer des gestes virtuels riches. On présente maintenant les quelques instrumentistes virtuels utilisés dans la pièce.

Le « batteur »

En reliant la précédente MAS à un point fixe (SOL) par un élément REF, on obtient évidemment un oscillateur. Mais on peut fixer son paramètre K de façon à ce qu'il oscille en basse fréquence (1Hz par exemple). Equipé d'un plectre-LNL, cet oscillateur exécutera des pincements répétitifs à ce tempo (noire=60) sur toute SV à laquelle il sera lié. Si de plus, on donne une valeur Z non nulle au module REF, le batteur se fatiguera au bout d'un certain temps et cessera de jouer.

Ce point de départ suggère de considérer ensuite toutes les structures déjà envisagées pour la création sonore et de leur appliquer un simple changement d'échelle temporelle (il suffit par exemple, pour les structures linéaires, de diviser K et Z par 10^6, à M constant, pour multiplier par 1000 toutes les constantes de temps). Ceci permet de récupérer à l'échelle temporelle du geste toutes les formes d'évolution à l'échelle de la vibration sonore. Mais le monde n'est pas aussi banalement fractal et il est certain que si certaines transpositions valent, d'autres n'ont pas de pertinence. Et enfin, il est à coup sûr des formes à découvrir, qui n'ont de pertinence ou de sens qu'à cette échelle. Quoi qu'il en soit, quelques cas simples se présentent, qui ne sont pas dénués d'intérêt.

Le « serpent »

Une corde construite avec de lourdes masses (1000 fois l'inertie des précédentes, par exemple) permet de produire des ondulations à l'échelle visuelle-gestuelle. Ondulations qui peuvent être perçues comme des ondulations corporelles ou comme les vagues d'un phénomène naturel (mer ou champs de blé sous le vent). On a construit de cette manière une sorte de « serpent » que l'on a doté, sur toute sa longueur d'une multitude de plectres venant égrener leurs pincements sur les séries de cordes d'une cithare (figure 5). Choisissant précisément l'ordre des cordes, et administrant une percussion à la tête du serpent, on obtient d'intéressants jeux mélodiques (exemple sonore N° 1).

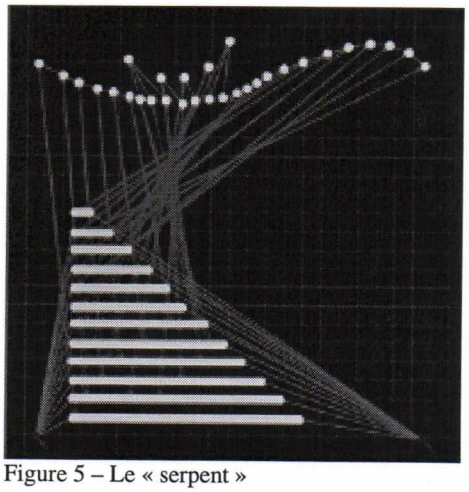


Figure 5 – Le « serpent »

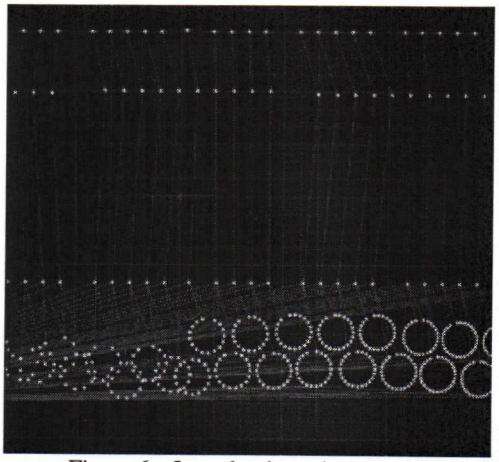


Figure 6 – Le « domino » jouant sur les ANNEAUX

Le « domino »

En remplaçant les REF du serpent par des BUT, on obtient une chaîne de MAS qui se percutent en série. Démarrant avec toutes les MAS au repos et donnant à la première une impulsion, on obtient un phénomène en cascade, où chaque MAS se déclenche un certain temps après sa voisine (de gauche ou de droite selon le sens qu'on a choisi). Le temps entre chaque déclenchement peut être déterminé à l'aide du paramètre de seuil S dans les BUT(ées). C'est un moyen, après la génération mélodique, d'effectuer une génération rythmique.

Dans la pièce, on a utilisé un tel « jeu de domino » pour créer une salve de sons percussifs en glissando (exemple sonore N°2). On a créé pour cela une série d'anneaux de tailles croissantes, et équipé chaque MAS d'un percuteur (fig. 6).

Ces trois exemples présentés de manière anecdotique introduisent et illustrent l'idée de la construction d'événements macro-temporels à l'aide de dispositifs particules-interaction. Ils ne couvrent pas l'étendu des possibles, mais ils sont néanmoins complémentaires et nous permettent d'anticiper sur la possibilité d'un formalisme général, en extension de la base élémentaire introduite plus haut. Ce formalisme est construit sur une abstraction de la métaphore de l'instrumentiste et peut se mettre en œuvre à travers un niveau et un langage d'édition des structures et des paramètres appropriés.

Hiérarchie et interactions

On peut penser que la relation instrumentiste-instrument est hiérarchique (l'instrumentiste peut jouer de l'instrument et non l'inverse). Revenant au « batteur », on peut constater par exemple, que si celui-ci « bat » avec un percuteur et non avec un plectre, la collision du percuteur et de la SV percutée va intervenir en cours de route, modifier la course de la battue et en conséquence le tempo. L'instrument, dans ce cas, joue bel et bien de l'instrumentiste. Il faudrait pouvoir y remédier.

Hiérarchie instrumentiste-instrument

Considérons les perfectionnements suivants : donnons tout d'abord une inertie importante à la MAS du batteur (1000 fois celle du « battu »), et modifions la valeur de son K de façon à préserver son tempo (on rappelle qu'en multipliant tous les paramètres par un même coefficient, on ne change rien aux constantes de temps). Equipons le batteur d'une baguette constituée d'un ensemble REF-MAS, fixons l'inertie de cette nouvelle MAS à une valeur identique à celle du percuté et donnons à ce nouvel oscillateur une fréquence égale à celle du batteur. Fixons encore Z à la valeur critique (ce qui a pour effet d'empêcher la baguette d'osciller) et enfin, déplaçons le tout à une distance de la SV légèrement inférieure à l'amplitude de la battue. Le tempo de la battue deviendra alors absolument régulier et imperturbable.

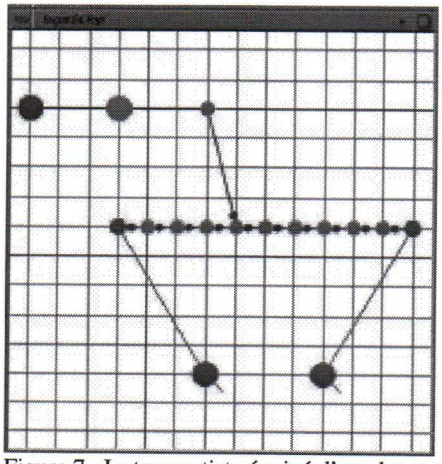
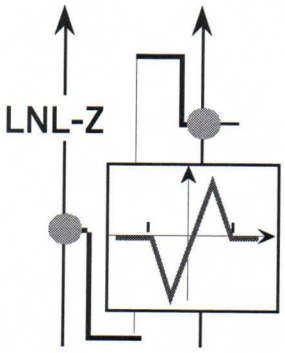


Figure 7 –Instrumentiste équipé d'une baguette

Figure 8 – Frottement d'archet modélisé avec un LNL-Z



Egalité des instrumentistes et des instruments

Maintenant que l'on sait pouvoir faire respecter la hiérarchie, on est libre d'en revenir. En diminuant progressivement l'importance (l'inertie) de l'instrumentiste, et réintroduisant une relative symétrie, on entre dans un univers fascinant : d'insensibles fluctuations perturbent d'une manière étonnamment vivante la régularité des battues et, après un certain temps, suffisamment long, le batteur ayant perdu une partie de son énergie dans l'instrument, s'arrête de jouer. La même expérience, plus poussée, à été réalisée avec un batteur ayant un bras de 300 mètres de long, muni d'un plectre et jouant d'une corde (de dimensions normales), à cette distance. On a alors obtenu des fluctuations d'intensité du pincement (liées à la phase de la vibration de la SV au moment de l'arrivée du plectre) laissant naître ce qui apparaît à s'y méprendre comme des accents volontaires (exemple sonore N°3). Ce type de phénomènes, facilement reproductible (mais pas forcément faciles à contrôler), apparaît en particulier quand les rapports d'échelle sont élevés. Ce n'est bien sûr pas sans faire penser, à juste titre, à ce que l'on appelle la « sensibilité aux conditions initiales » dans la théorie des phénomènes chaotiques, et à sa fécondité en termes de morphogenèse. Ceci nous a conduit à considérer qu'il y avait quelque chose d'assez fondamental dans une telle situation, impossible au sein des formalismes à hiérarchie absolue, qui se caractérise par deux choses : la mise en relation de deux processus dont les échelles sont (très) différentes, et la préservation d'une réelle interaction entre ces deux échelles, même si celle-ci reste relativement dissymétrique. On a utilisé ce principe (qui n'est pas forcément facilement domesticable) dans la pièce et on a décidé à ce moment-là… de son titre.

Le « chef »

On peut introduire un nouvel ordre de hiérarchie : Soit une MAS utilisée en tant que partie d'un excitateur de type frottement d'archet, avec un module LNL approprié (une viscosité non-linéaire avec une caractéristique comme celle de la figure 8). Si on lui donne une vitesse initiale, ce violoniste virtuel jouera une note unique, du début à la fin de la pièce. Ce qui peut s'avérer lassant.

Une manière simple de changer cela est d'introduire un nouveau protagoniste : un « chef virtuel » (toujours en restant métaphorique). Dans cet univers, sa plus simple représentation est une MAS (!) d'inertie au moins 1000 fois celle de l'instrumentiste qu'il dirige et qui, dans le cas simple présent, sera liée à celui-ci par une liaison de percussion (BUT). Avec ce dispositif à deux étages, le « chef » percute le « violoniste » et peut déclencher son jeu à un moment et avec un quantum de mouvement donnés. On comprend ici l'esprit de la métaphore, qui transforme toutes les catégories d'interactions, aussi bien physiques que symboliques en interactions physiques d'un seul type conçues en termes d'inerties, déplacements, vitesses, viscoélasticités, etc. Cette mise à plat serait tout à fait scandaleuse si on la prenait à la lettre, mais d'une part, au niveau élémentaire, elle permet de rendre compte de toutes les catégories d'interaction, d'autre part, elle permet de gérer de manière totalement libre le degré de hiérarchie ou de symétrie dans ces relations. Le « chef », si son inertie est voisine de celle du violoniste, peut être influencé (voir dissuadé de continuer) par le jeu de celui-ci.

Un tel chef peut évidemment diriger n'importe quel type d'instrumentiste de la même façon, et en conduire également un nombre quelconque, pourvu que son quantum de mouvement initial soit suffisant pour une distribution significative à chacun d'eux. Ce qui est en revanche plus inhabituel est que peuvent cohabiter autant de chefs que l'on veut, et que l'on peut introduire toutes les hiérarchies possibles entre eux, que le chef suprême, celui qui est au sommet de la hiérarchie, n'est pas non plus nécessairement unique et enfin que l'on peut introduire entre les différents niveaux un degré quelconque de bilatéralité[7]. C'est dans ce type d'organisation, fondé sur une systématisation du paradigme de l'interaction plutôt que sur une hiérarchisation figée, que l'on a pu créer les phénomènes les plus riches. Nous avons assez d'éléments maintenant pour comprendre de quelle manière on peut, dans le cadre des réseaux CORDIS-ANIMA envisager de créer des phénomènes macro temporels complexes. Notons que les échelles spatiales et temporelles, d'ailleurs sont associées puisque c'est en étendant la première que l'on a pu étendre la seconde.

On a introduit ici ces idées à l'aide d'exemples simples et anecdotiques pour la facilité de l'explication, mais ceci peut être formalisé le plus sérieusement du monde, et porté par des langages rigoureux, simples et cohérents. Ce que nous introduisons dans les « couches évoluées » de l'interface GENESIS.

3 La construction

La construction d'une pièce dans ce contexte consiste tout d'abord en celle de deux catégories de composants, les « instruments » et ce qui en joue (toutes professions confondues), correspondant à deux échelles temporelles différentes : celle de la microstructure et celle de la macrostructure. Pour chacune, on a à « composer » des objets, c'est-à-dire mettre ensemble et lier des éléments qui sont définis hors du temps : les différentes MAS et leurs interactions. Ces objets ne sont pas temporels, mais ils engendrent des événements temporels. Composant les objets, nous avons une totale liberté dans le choix de leurs propriétés. Sur ce degré de liberté, nous pouvons appliquer des choix arbitraires ou des règles de n'importe quelle nature. Par exemple, pour le jeu de 8 TRIANGLES utilisé dans la pièce pour son « climat harmonique », on a utilisé une règle fondée non pas sur leurs hauteurs, mais sur leurs propriétés topologiques. Détaillons un peu :

« Harmonie des causes »

Ces TRIANGLES sont caractérisés par leur nombre de lignes (voir la figure 2), 15 pour le plus grand. On peut connaître rigoureusement la composition spectrale des sons qu'ils produisent (module d'analyse dans GENESIS). Et on peut également les ajuster de façon que leurs hauteurs se rangent dans celles d'un accord donné. Ayant opéré ainsi, nous avons des accords ne sonnant que très pauvrement. En effet, cette « composition » n'est pas cohérente car elle met ensemble deux choses étrangères. Nous avons alors changé de stratégie pour opérer une mise en relation à partir de rapports également simples non pas sur les fréquences, mais sur les dimensions topologiques des objets : en prenant différentes « tailles » pour ces TRIANGLES, telles que 15, 12, 9, 7, etc. Sans tomber dans la numérologie, il est apparu que ces sons aux structures spectrales complexes et sans rapports évident entre elles, laissent émerger, au-delà de toute évocation d'accords « classiques » une sensation de cohérence prégnante lorsqu'on les implique dans des relations multiples. Cette cohérence résulte de lois simples appliquées non plus sur les « effets », mais sur les « causes ».

Dans un deuxième temps, nous avons à composer « l'orchestre », c'est-à-dire mettre ensemble les différents composants (instruments et acteurs). A nouveau, les choix peuvent être arbitraires (ils doivent seulement respecter les conditions pour que « ça fonctionne »). Dans cet espace, toutes les combinaisons correspondant à notre propos expressif sont possibles. Mais on doit noter qu'il ne s'agit toujours pas d'une construction temporelle. Les aspects temporels peuvent émerger de ces assemblages, mais nous n'agissons pas explicitement sur eux. On notera au passage, que les différents niveaux d'objets peuvent être très imbriqués : par exemple, dans la pièce, les TRIANGLES sont utilisés pour deux fonctions différentes, en tant que structures vibrantes pour un certain sous-ensemble, et en tant que table de résonance pour un autre.

Puis pour finir, nous avons à composer les événements déclencheurs : les « quantum gestuels ». Pour ces gestes élémentaires déclencheurs, on a évidemment tous les choix possibles en fonction de l'expression voulue. Notons qu'en situation temps-réel ces éléments sont l'exact pendant de ce que l'on a appelé par ailleurs des « gestes d'excitation élémentaires »[8]. Notons aussi que ces événements peuvent déclencher aussi bien des événements simples (de l'ordre de la note) que des séries complexes d'événements interdépendants.

La scène GENESIS complète mise en œuvre pour *pico..TERA* est figurée ci-après :

---

[7] Notons toutefois qu'à ce stade, aucune anarchie n'est encore à craindre car l'opérateur qui est devant l'écran et conçoit tout ce petit univers, demeure bien stable dans sa fonction « d'hyper-chef ».

[8] Cadoz (C), 1999. "Musique, gestes, technologies". in "Les nouveaux gestes de la musique". Dir. H. Genevois et R. de Vivo. Cadoz (C), Wanderley (M), 2000. "Gesture and Music". in Trends in Gestural Control of Music. IRCAM Editeur. CDROM.

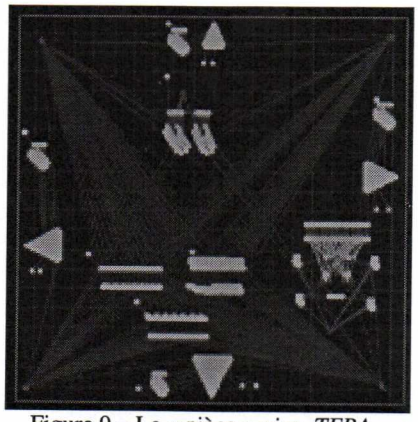


Figure 9 – La « pièce » *pico..TERA*

4 Un déplacement de paradigme

On a montré qu'il était possible de créer une séquence sonore (micro et macro structurée) de la durée d'une pièce musicale à l'aide d'un seul réseau (complexe) du type modèle physique particulaire. On a établi, à travers des exemples, que le processus de construction était possible à tous les niveaux de la structure musicale. Dans son principe, la modélisation physique particulaire permet un lien intime entre les différents niveaux structurels et introduit un concept nouveau : l'interactivité entre les échelles. Les échelles ne sont pas nécessairement envisagées exclusivement en termes de structures temporelles, mais les entités qu'on y manipule peuvent être aussi phénoménologiques ou causales. On a ainsi montré qu'un paradigme unique s'appuyant sur un très petit nombre de fonctions de base permettait de s'attacher sans rupture à tous les niveaux de la structure.
Mais le plus important, qui correspond à un véritable « déplacement de paradigme » (*paradigm shift*) réside dans un changement fondamental de point de vue : généralisant le principe initial de la synthèse sonore par modèle physique (*penser et agir à travers les causes plutôt qu'à travers leurs effets*) , dont la pertinence a été largement vérifiée, on a montré qu'on pouvait l'appliquer à la construction musicale dans son entier.

Note

Les travaux de l'ACROE sont soutenus financièrement par le Ministère de la Culture et de la Communication et par le Ministère de la Recherche et de l'Education Nationale.