

LE PROBLEME INVERSE DANS LA SYNTHÈSE SONORE ET LA CREATION MUSICALE PAR RESEAUX MASSE-INTERACTION

Jérôme Villeneuve

Laboratoire ICA,
Institut polytechnique de Grenoble
jerome.villeneuve@imag.fr

Claude Cadoz

Laboratoire ICA,
Institut polytechnique de Grenoble, ACROE,
Ministère de la culture et de la communication
claude.cadoz@imag.fr

RÉSUMÉ

La synthèse sonore par modèle physique particulière développée au laboratoire ICA et à l'ACROE avec le langage CORDIS-ANIMA et le logiciel de création sonore et musicale GENESIS se présente aujourd'hui comme un paradigme général susceptible de constituer le cœur d'un environnement complet pour la création musicale, de la création du son à la composition macro-temporelle et macro structurelle.

Le « problème inverse » dans ce contexte se pose lors d'une des phases possibles du processus de création : étant donné un résultat (sonore, simple ou complexe) fixé comme cible, quel modèle physique (dans tout ce qui le caractérise) mettre en jeu pour l'obtenir ? Plus généralement, il s'agit de déterminer des méthodes permettant de définir le plus complètement possible un processus générateur à partir d'un ensemble de connaissances sur ce qu'il doit engendrer. Cet article vise à formaliser cette problématique inverse ainsi qu'à en exposer les premières résolutions pratiques.

1. INTRODUCTION

Les évolutions technologiques ont de tout temps eu un impact décisif sur la pratique des Arts, entraînant des mutations profondes qui précèdent souvent celles de la pensée elle-même. Dans le cas de la musique, elles ont concerné tour à tour les instruments, les techniques de jeu, les méthodes de transcription et de transmission des œuvres musicales. L'électricité et l'électronique ont provoqué une première révolution non plus seulement dans la nature de l'objet média, qui devient le son lui-même, à partir de l'enregistrement, mais aussi dans le processus de sa création, comme dans la Musique Concrète, à la fin des années 50. Mais l'avènement de l'ère numérique, voilà un peu plus d'un demi-siècle, se prolongeant dans l'intercommunication en réseau généralisée (Internet) provoque une seconde déflagration. L'informatique est devenue partie intégrante de tous les processus engagés par les démarches musicales. De l'apprentissage à l'interprétation ou l'analyse, de la composition à l'enregistrement et à la diffusion, les approches informatiques se multiplient et se diversifient toujours plus. Mais dans le même temps le phénomène sonore se détache radicalement du corps et de la matière et même de l'espace. L'une des étapes clés est celle de la

synthèse numérique du son, introduite par Max Mathews en 1957 dans les laboratoires de la Bell Telephone aux Etats-Unis, avec les premiers programmes de synthèse par blocs fonctionnels de la série qui donne naissance à Music V.

Le travail présenté ici entre dans le cadre de la synthèse du son qui a fait l'objet d'une certaine variété d'inventions dans les premières décennies, depuis la synthèse par tables d'ondes et blocs fonctionnels (MUSIC V), par modulation de fréquence [9], par distorsion non-linéaire [2], la synthèse granulaire [13] pour ne citer que les principales. La synthèse par modèle physique [1, 3, 15], quant à elle, bien qu'elle puisse se présenter en effet comme une méthode de synthèse, correspond toutefois à un changement de paradigme profond. En particulier, l'approche par interaction instrumentale et réseaux masses-interactions portée par les technologies de Transducteurs Gestuels à Retour d'effort (TGR), le formalisme CORDIS-ANIMA [4] mis en œuvre à travers l'environnement de création musicale GENESIS [8], tous trois créés par le laboratoire ACROE-ICA. Cette approche propose un déplacement essentiel de l'objet. Le phénomène sonore (porté par le signal numérique) n'est plus l'objet d'intérêt en soi, c'est ce qui en est la cause : « l'objet instrument » et « l'interaction instrumentale » établie entre l'instrumentiste et l'instrument. Il est évident ici que les notions d'instrument et d'instrumentalité sont à prendre dans un sens large [6].

Ainsi, la création du son à l'aide de GENESIS s'appuie en particulier sur la simulation de la matière (dans ses mouvements, déformations, vibrations, échanges énergétiques), à l'aide d'algorithmes numériques. Selon cet aspect, et en tant seulement que procédé de synthèse sonore, la simulation d'objets physiques à l'aide des réseaux masses-interactions CORDIS-ANIMA (CA), intrinsèquement modulaires, permet de couvrir une très grande variété de phénomènes sonores, très naturels et « réalistes » ou non. Par ailleurs, la manipulation des paramètres de contrôle des algorithmes de simulation, fondés sur des notions physiques élémentaires comme l'inertie, la raideur, la viscosité le déplacement ou la vitesse de déplacement, est relativement intuitive. Toute démarche créative à l'aide de l'environnement GENESIS suppose donc, au départ, l'élaboration d'un réseau de type masses-interactions selon le formalisme CA, que l'on

appellera un « modèle ». Correspondant à un agencement structuré plus ou moins complexe de modules, représentant respectivement des éléments matériels et leurs interactions, un tel modèle reçoit un ensemble d'informations quantitatives à travers la spécification paramétrique de chacun de ses modules. Le modèle est alors calculé algorithmiquement et de cela résulte un phénomène sonore.

Nous appellerons « démarche directe » ce processus initial qui conduit de l'élaboration du modèle à l'obtention du phénomène sonore.

Le processus de création du son, en tant que matériau, comme de la structure musicale complexe qui le met en œuvre, suppose toutefois des allers-retours permanents entre deux pôles, d'un côté ce qui engendre, ici le modèle, de l'autre ce qui est engendré, ici le phénomène sonore soumis à la perception. Or les descriptions explicites que l'on peut donner de nos perceptions d'un son et de la cause qui le produit ne se correspondent pas nécessairement simplement. Un problème inhérent à la création sonore, en particulier à l'aide de différents procédés de synthèse, fondés ou non sur la modélisation physique, est celui de la relation entre ces deux pôles. Dans le sens direct on cherchera à connaître a priori l'incidence de la modification de telle ou telle donnée, dans la structure ou le paramétrage de l'algorithme sur les attributs perceptifs du phénomène produit. Dans le sens « inverse », on se demandera quel modèle élaborer et quel paramétrage lui conférer pour obtenir tel attribut perceptif prédéfini.

De nombreuses expérimentations ont été réalisées dans l'environnement GENESIS depuis sa première mise en œuvre pratique en 1996¹. De nombreux modèles ont été élaborés, également, à des fins musicales [5]. Des travaux théoriques ont, enfin, permis de proposer une typologie efficace des composants et fonctionnalités générales de tout modèle CA pour la création sonore [16]. De ces travaux résulte une base de connaissance permettant de relier de manière dense l'espace des modèles et l'espace sonore. Néanmoins, la question de savoir *a priori* quelle configuration et quel paramétrage correspond à un phénomène sonore arbitrairement donné et ne figurant pas nécessairement dans l'ensemble des phénomènes déjà obtenus ou connus demeure dans son principe. C'est cette situation qui introduit ce que nous appelons ici la démarche inverse, et le problème spécifique qui lui est associé : Etant donnée la caractérisation d'un phénomène sonore, quel modèle GENESIS mettre en œuvre pour l'engendrer

2. LE PROBLEME INVERSE

L'étude des sciences a fait émerger de nombreuses problématiques inverses. Cela s'explique par le fait que l'observable est plus souvent le produit d'un système que le système en soi (parfois inaccessible ou totalement

inconnu), et que l'étude de ce que produit un système peut nous amener à le définir. L'une des principales difficultés émergeant de ce type d'étude est liée à la notion de déterminisme.

2.1. A propos du déterminisme

En physique, on parle de déterminisme lorsque pour un état connu d'un système, un seul et unique effet est observé, et ce, quel que soit le nombre d'itérations du processus. Cependant, cette notion est remise en cause par notre incertitude quant à la précision et la complétude de la description des configurations et paramètres propres à un système. Sommes-nous capables de cerner l'intégralité des conditions régissant un système physique ? Certes non, mais le comportement de ce système ne dépend a priori pas non plus de manière critique de tous les paramètres que l'on pourrait lui trouver.

S'il nous est interdit de concevoir un déterminisme absolu, nous pouvons néanmoins l'approcher à mesure que notre niveau de connaissance et de compréhension dudit système grandit (à force d'expérimentation par exemple). Nous serons alors à même d'isoler les caractéristiques significatives le décrivant. Dans la mesure où, à très faible modification de ces caractéristiques, les effets engendrés par le système sont également très faiblement altérés, nous le qualifierons de « stable ». Nous pourrions alors estimer qu'une cause n'engendrera qu'un effet.

Dans notre cadre d'étude qui s'encre sur la simulation numérique d'objets physiques, user de l'outil informatique nous permet d'établir une définition plus tranchée de la notion de déterminisme. L'ensemble des paramètres d'un modèle étant parfaitement fini et accessible, alors nous pourrions parler d'un déterminisme absolu régissant l'acte de modélisation. En effet, dans le cadre de la simulation et donc dans celui de l'utilisation du simulateur CA à travers son interface GENESIS, si nous nous intéressons aux modèles (définis par leurs structures, leurs paramètres et leurs états initiaux) en tant que causes, et aux signaux numériques qu'ils produisent en tant qu'effets, une cause donnée engendrera rigoureusement toujours le même effet.

Dans le monde physique réel comme dans le monde physique simulé, en revanche, le déterminisme n'a pas de réciproque. Il n'est jamais possible d'affirmer que deux observations différentes conduisant au même effet, aussi fine soit l'analyse, résultent d'une même cause. L'ombre portée sur le sol par une maison éclairée par le soleil peut être exactement la même que celle produite par un décor en carton découpé, ou par la même maison dont on aurait enlevé des éléments dans la partie éclairée par le soleil. De même, l'algorithme de simulation d'un oscillateur mécanique du second ordre donnera rigoureusement le même signal numérique, observé bit à bit, si tous ses paramètres sont multipliés par le même coefficient. En conséquence, il est

¹ Workshop International sur la modélisation physique et la création musicale et visuelle, organisé au ZKM à Karlsruhe (Allemagne).

nécessaire de toujours considérer qu'un effet donné peut avoir des causes multiples, différentes. Et par ailleurs, c'est bien là une des quêtes de la simulation elle-même puisqu'il s'agit dans certains cas de faire en sorte que le simulacre soit le moins possible distinguable de l'objet qu'il est censé représenter.

De ce constat on déduit une difficulté intrinsèque au problème inverse en général et à laquelle notre problème particulier n'échappe pas. L'information portée par l'effet est insuffisante et nous ne pouvons donc pas en imaginer une cause unique. Cependant, au regard du contexte dans lequel prend place notre étude, la recherche d'un modèle générateur unique d'un phénomène sonore donné a priori n'est pas une nécessité. Ce qui importe est la possibilité d'en trouver au moins un qui pourra ensuite être l'objet à nouveau d'un processus d'exploration directe. Ce qui revêt un intérêt spécifique est alors de pouvoir explorer l'espace des effets possibles en effectuant des variations paramétriques, voire structurelles, autour du modèle mis au jour, sachant que cela pourra conduire à une extension de l'espace des phénomènes sonores autour du phénomène considéré au départ.

On voit alors l'intérêt particulier que peut revêtir l'ensemble de la démarche, articulant les explorations directes et inverses dans le processus de création général. La multiplicité des solutions n'est donc pas un problème en soi. Ce qui sera en revanche particulièrement important, sera d'être à même de déterminer si au moins une solution existe, et, en cas de solutions multiples, quelle information complémentaire devra être apportée pour conduire à une solution unique. C'est essentiellement à travers des hypothèses a priori sur certaines propriétés générales du modèle, guidées par la théorie et par l'expérience de modélisation, que ces informations complémentaires pourront être cherchées.

Enfin deux critères guideront la recherche des solutions : la simplicité et la cohérence du modèle trouvé et, selon une autre ordre de considérations, l'efficacité formelle et calculatoire de la méthode de résolution.

2.2. Problème Inverse « bien posé »

Cette rupture du déterminisme nécessite une formulation très précise de la problématique inverse. Nous devons en définir le plus pertinemment possible, tenants, aboutissants et méthodes afin de réduire au maximum l'espace des solutions. Hadamard dit d'ailleurs que l'on peut qualifier un problème mathématique de « bien posé » à condition de respecter trois points essentiels lors de son énonciation : vérifier qu'une solution au dit problème existe, qu'elle est unique et que la dépendance de cette solution aux données en entrée est continue sur un spectre d'étendue raisonnable.

Notre première problématique n'est donc pas tant « le problème inverse » en soi, mais bien la définition dudit

problème. Ainsi, nous tâcherons par la suite de définir clairement ce que l'on attendra en sortie de l'algorithme de résolution inverse et bien sûr, quel sera le type de données qu'il prendra en entrée.

3. OBJECTIF CONCRET - SORTIE DE LA RESOLUTION DU PROBLEME INVERSE.

Dans la nature, comme au sein de l'univers virtuel GENESIS, produire un son est associée à un échange d'énergie entre deux corps (virtuels dans le deuxième cas). Un corps « source » que sera l'instrumentiste et un corps instrument dont l'état sera modifié par cet apport d'énergie et dont la nature rend cette modification d'état audible. L'interaction portant cette énergie de l'un vers l'autre sera également déterminante dans la spécification du phénomène sonore induit. Se dessine donc une configuration tripartite (Fig. 1) indissociable dans la production et l'éventuelle description du phénomène sonore. Le phénomène ainsi généré est alors unique de par sa configuration génératrice. Par analyse inverse, il est évident que la « lecture » de ce phénomène ne nous permet de remonter ni à l'objet physique instrumental, ni à une action de l'instrumentiste sur cet objet, mais à une représentation de ces deux éléments qui ne permettrait en aucun cas de les identifier indépendamment. Ainsi, on ne remonte pas à l'objet générateur, mais au couple objet-instrumentiste. De plus, cette généralisation peut être encore plus large si l'on décide d'intégrer ce qu'il y a en amont du geste instrumental, c'est-à-dire le processus mental de l'instrumentiste qui conduit à la commande motrice. Il n'est bien sûr pas question ici de tenter d'identifier et de décrire les éléments de la commande motrice, par exemple en termes neurocognitifs. En revanche, considérant que le geste instrumental dans son ensemble implique un système mécanique actif, le corps et les muscles, on s'intéressera à un principe de décomposition de l'instrumentiste en deux composants, l'un correspondant à un système purement physique et l'autre à une commande interne au sujet. On appellera pour simplifier ici « commande motrice » cette commande interne. Un aspect important ici est qu'alors que l'interaction entre le système physique représentant le corps et l'instrument doit être considérée comme bilatérale, la relation de la « commande » sur le système physique corporel sera considérée comme unidirectionnelle.

Cette représentation a un intérêt fondamental pour le processus de création par le fait que la double identification « système physique corporel » / « commande motrice », indépendamment de toute correspondance effective avec la réalité physiologique et neurologique, permet d'introduire un nouveau type d'expérimentations dans le sens direct. Fondés sur des transformations indépendantes de la commande et du système physique corporel, ces traitements préserveront la cohérence énergétique de la relation instrumentiste / instrument.

Pour résumer, deux hypothèses fondamentales viennent définir ce que nous pouvons attendre d'une solution valide du problème inverse le plus général dans le cadre de GENESIS :

1) Le phénomène sonore considéré résulte de l'action d'un instrumentiste (par des gestes) sur un instrument.

2) Les gestes eux-mêmes sont considérés comme résultant d'une « commande interne » de l'instrumentiste agissant sur son corps en interaction avec l'instrument.

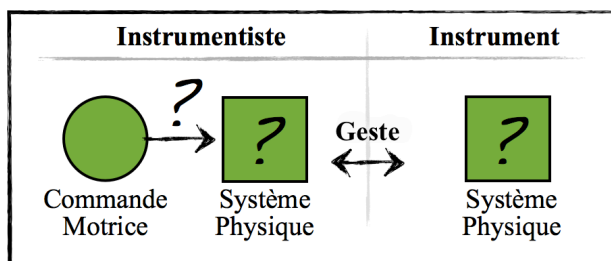


Figure 1. Configuration génératrice du phénomène sonore.

3.1. Typologie en entrée du problème inverse

Si la nature des objets solutions de la résolution du problème inverse est relativement bien définie et contrainte par l'environnement GENESIS, il n'en est pas de même pour ce qui est de celle des données en amont de ladite résolution.

Nous nous appliquons donc à dresser une typologie la plus exhaustive possible des données présentables en entrée du problème inverse. Il est important d'en distinguer d'emblée deux types :

- Un premier étant de bas niveau, directement en entrée de la résolution inverse. Il s'agira en fait de paramètres avec lesquelles serait initiée la méthode algorithmique de résolution. Nous pensons par exemple à des valeurs numériques identifiant fréquence, amplitude et temps d'amortissement dans le cas d'un signal simple.

- Un second, plus général, se situerait en amont de cela. Nous pensons par exemple à un enregistrement concret du phénomène sonore, à une partition de musique ou encore à une expression verbale que l'artiste pourrait donner de la représentation mentale de ce qu'il souhaite produire. Ce type d'entrée correspondra évidemment à un usage plus courant de la description des phénomènes sonore. Il est donc nécessaire d'imaginer inclure un outil d'analyse adapté permettant le passage de ce type de données à des données de plus bas niveau utilisable par un algorithme mathématique.

Cette première distinction imposée n'est pas sans rappeler la tripartition de Molino et Nattiez [12] qui soutient que toute oeuvre musicale peut être abordée de trois points de vue : le niveau poïétique (point de vue de la production), le niveau esthétique (point de vue de celui qui reçoit le message musical) et le niveau immanent de l'oeuvre (niveau neutre). Ce principe

triadique est tout-à-fait transposable à la production du son lui-même [7]. Le niveau neutre relevant dans notre cas du premier type de données, à savoir existant indépendamment de notions perceptives. Le niveau esthétique correspondant au second type de données, abstrait et subjectif. Le niveau poïétique étant essentiellement mis en oeuvre dans le sens direct de la modélisation physique du dispositif dans le cas de GENESIS.

Nous détaillerons par la suite les différents moyens de décrire et caractériser un phénomène sonore. Pour chacun d'eux, nous proposerons des pistes d'analyses permettant d'établir une correspondance entre les notions desquelles ils font usage et des paramètres utilisables en entrée d'un algorithme inverse.

3.1.1. Représentation cognitive

L'humain est naturellement doté de nombreux moyens lui permettant de percevoir le monde qui l'entour. S'agissant de la perception et de l'identification de phénomènes sonores, les performances de ces moyens sont encore aujourd'hui bien supérieures à toutes approches technologiques visant à les imiter. L'essentiel de leur efficacité et de leur puissance, en particulier analytique, vient du fait qu'ils reposent en partie sur les acquis de l'expérience et sur le patrimoine cognitif d'un individu. Ainsi, un phénomène sonore fait sens s'il évoque des caractères déjà connus ou du moins identifiables au sein du patrimoine cognitif de l'individu. Dans tout les cas, un phénomène sonore (ainsi que toute l'information contextuelle qui lui est propre) en devient partie intégrante dès lors qu'il est perçu par les tympans et le dispositif de l'oreille interne.

Ce sont de ces mêmes acquis de l'expérience de l'individu, qu'émergent des capacités telles que l'extrapolation et la créativité permettant une existence du processus de création en amont de toute concrétisation active et sensible. L'artiste dira « l'imagination » !

3.1.2. Représentation matérielle abstraite

Le processus de création dans sa totalité (mentale, instrumentale, sensorielle et sociale) suppose alors la possibilité de passages de représentations mentales à des représentations matérielles objectives, partageables, communicables ou seulement témoins des étapes de son processus pour le sujet lui-même. Ces représentations matérielles, dans la pratique musicale habituelle, seront par exemple des lexiques (pour les phénomènes sonores), des symboles (par exemple ceux de la notation musicale classique). Quelle que soit leur nature, elles doivent présenter une certaine stabilité et faire l'objet d'un consensus, de conventions garantissant la possibilité de leur usage collectif.

C'est bien sûr le rôle fondamental de la notation musicale classique, dont les développements en Occident remontent au Moyen-Age et sont toujours en

vigueur aujourd'hui. On sait bien, cependant, que dans la notation musicale occidentale il est moins question du son en soi que de la structuration événementielle et sur la simple valeur de la hauteur des notes [12]. Les détails par exemple de l'intensité d'un son ou même de la nature de ce son ne tiennent parfois que dans des indications allant d'annotations de nuances à une indication sur le type d'instrument impliqué. Ce qui relève des sens, et de la structure, la texture, la facture du son n'est pas représenté.

Il est important de noter qu'au-delà de la non-universalité de telles représentations (nous pensons par exemple à la variété des notations propres à la musique tempérée, certaines musiques contemporaines ou encore indiennes) elles sont néanmoins une première approche de théories descriptives et analytiques des phénomènes sonores au sens mathématique du terme. Ceci aidant bien sûr à imaginer une transition entre les représentations matérielles abstraites et des objets mathématiques dont nous pourrions tirer parti dans une procédure algorithmique. Si nous nous attardons sur la notion de note, il n'est pas inconcevable de la considérer en tant que telle dans la pratique de GENESIS. Il est d'ailleurs possible aujourd'hui d'accorder une structure à une note (fréquence fondamentale donnée), mais nous sommes loin des considérations nécessaires à l'entière description d'un son.

3.1.3. Représentation matérielle concrète

Schaeffer pose la solution de l'enregistrement comme absolue description du son. « *Le mot concret ne désignait pas une source. Il voulait dire qu'on prenait le son dans la totalité de ses caractères. Ainsi un son concret, c'est par exemple, un son de violon, mais considéré dans toutes ses qualités sensibles, et pas seulement dans ses qualités abstraites qui sont notées sur la partition. Je reconnais que le terme concret a été vite associé à l'idée de sons de casserole, mais, dans mon esprit, ce terme voulait dire d'abord qu'on envisageait tous les sons, non pas en se référant aux notes de la partition, mais en rapport avec toutes les qualités qu'ils contenaient* » [14]. Extraire une information exploitable de cette représentation pourrait alors se faire par analyse sensorielle, interprétation matérielle ou analyse matérielle.

Analyse Sensorielle

L'enregistrement fixe le phénomène sonore. Faute de pouvoir reproduire le contexte instrumental original, il est possible de réentendre son effet indéfiniment. L'analyse sensorielle fait référence à celle concernant la représentation mentale et la renforce en permettant l'écoute multiple d'un même phénomène. De plus, celui-ci et matériellement mémorisé, objectivé, et conséquemment, peut être partagé et décrit sans représentation abstraite intermédiaire.

Interprétation Matérielle (signal)

Le phénomène est retranscrit en un objet « tangible », un signal, celui-ci permettant une représentation visuelle du phénomène. L'oscilloscope pour un signal analogique, l'ordinateur pour un signal numérique permettent l'application d'opérations mathématiques de quantifications précises (dans la mesure où la transcription est rigoureuse et de qualité et où l'on a pu quantifier cette qualité). Cette transcription permet donc une extraction de caractéristiques du signal simple et relativement précise. Une analyse de l'enveloppe pour un signal numérique permet par exemple une extraction, dont la précision dépend de l'échelle de représentation, de paramètres événementiels (ou comportementaux). Ceci n'étant vrai que pour de très simples signaux (fréquence unique, *peak* bien différenciables, etc.)

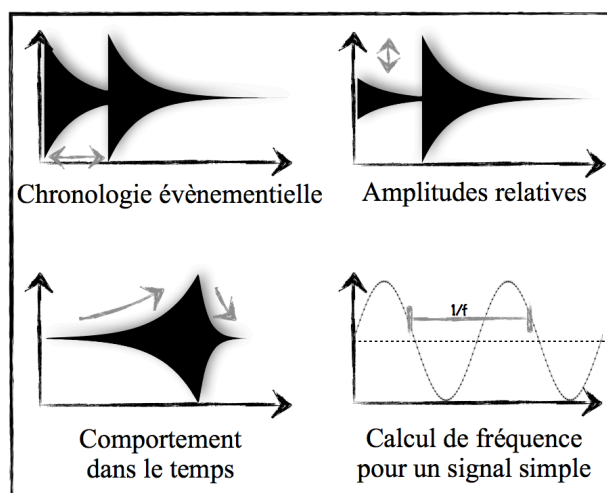


Figure 2. Interprétations de la représentation d'un signal sonore simple.

Analyse Matérielle (signal)

L'analyse du signal numérique, quant à elle, permet une caractérisation du phénomène considéré en paramètres de types acoustiques. S'appuyant sur des outils mathématiques dont la mise en œuvre est parfois complexe, et dont les résultats demandent généralement un grand travail d'interprétation, ce type d'analyse à l'avantage de se situer intégralement au sein de l'outil informatique. Ainsi, lors de l'étude à l'aide de ces outils d'un phénomène sonore dans sa représentation matérielle concrète numérique, l'information extraite sera directement exploitable par un algorithme de résolution inverse. Il est à préciser que le phénomène sonore n'est ici plus considéré en tant que tel. En effet, celui-ci sera disséqué afin d'être interprétable en paramètres acoustiques et de fait, cette analyse ne tiendra plus compte de sa cohérence originale. Cohérence fondamentale lors de l'analyse faite par l'homme et ses outils sensoriels par exemple.

4. PREMIERES REALISATIONS ET EXPERIENCES

Le formalisme CORDIS-ANIMA sur lequel repose la synthèse sonore par modèle physique dite particulière, permet de construire des objets sous forme de réseaux de modules élémentaires reliés les uns aux autres et dont on distingue deux catégories : les modules <MAT> qui correspondent à des points matériels ayant une inertie (module MAS; SOL pour une inertie infinie), et des modules <LIA> représentant l'interaction de deux modules <MAT>. On distingue plusieurs type d'interactions dont : la viscoélasticité (module REF) ou encore celle représentant l'interaction non linéaire de nature percussive (modules BUT). Ainsi, à l'aide de ce formalisme, il est possible de construire une infinité de réseaux masse-interaction différents et soumis à une vision discrète, spatialement et temporellement, des lois de la physique.

En vue d'une première approche pratique de la résolution du problème inverse, nous avons choisi de considérer le plus simple des modèles constructibles et audibles au sein de l'environnement GENESIS : la « cellule » (modèle d'oscillateur harmonique mécanique). Il est à la fois élémentaire dans sa construction, le nombre et la nature des paramètres qui le définissent et la caractérisation du phénomène sonore qu'il produit. Ainsi, un simple oscillateur harmonique est constitué en physique comme au sein du formalisme CORDIS-ANIMA, d'une masse d'inertie m reliée à un élément immobile par une viscoélasticité de raideur k et de viscosité z . Il oscille de plus selon un seul degré de liberté.



Figure 3. Modèle CA d'oscillateur harmonique.

Par ailleurs, l'oscillateur harmonique mécanique étant un objet bien connu et théorisé dans le domaine de la physique, les équations mathématiques le décrivant sont tout à fait applicables à un modèle numérique dès lors que l'on considère et quantifie l'impact du passage d'équations continues aux équations discrètes. Ainsi, nous avons une parfaite connaissance de cet objet et pouvons par simple calcul (et non simulation) et en connaissant m , k et z connaître ses caractéristiques modales, à savoir, sa fréquence propre et son temps d'amortissement (son amplitude et sa phase dépendent eux, des conditions initiales). Réciproquement, un simple renversement des calculs nous permet de retrouver, partant d'une fréquence, d'un temps d'amortissement, d'une amplitude et d'une phase, à une description en inertie, raideur, viscosité et conditions initiales d'une cellule portant ces caractéristiques modales. A noter, qu'afin de limiter l'espace des solutions et n'obtenir qu'un seul modèle solution, un des paramètres m , k ou z devra être contraint.

Nous tenons en ce renversement mathématique une première résolution du problème inverse pour le cas le plus simple, à savoir, un phénomène sonore de type mono fréquentiel, périodique, pseudo périodique ou apériodique. Une extension directe de cette résolution serait d'imaginer recomposer des sons plus complexes par composition de tels oscillateurs harmoniques. C'est en somme ce que propose la synthèse sonore additive. Connaissant la caractérisation modale (obtenue par analyse de Fourier par exemple) d'un phénomène sonore, celle-ci permet de le recomposer en synthétisant autant de signaux sinusoïdaux que nécessaire.

Une telle approche est exclue dans notre cas. Nous cherchons en effet à mettre au point un outil d'aide à la modélisation au sein de GENESIS, et ne pouvons donc pas considérer comme solution un modèle sans aucune cohérence et composé d'autant d'éléments et de paramètres indépendants que le phénomène sonore recherché est riche. Nous devons nous imposer un modèle générateur relativement complexe, ou du moins, dont aucune composante n'est isolé et indépendante du reste.

De même que pour la cellule, il existe pour les modèles complexes, un formalisme mathématique permettant d'estimer *a priori* leurs caractéristiques modales. Cet outil permet en fait de faire correspondre à un modèle CORDIS-ANIMA, un modèle équivalent dit modal. La partie calculatoire de la démarche directe consiste à déterminer la position à l'instant t de chaque élément mobile d'un modèle. Ce sont en effet les déformations de cette matière virtuelle qui produiront un phénomène sonore. Les algorithmes du formalisme CORDIS-ANIMA s'appliquent à résoudre le plus efficacement possible les équations définissants de tels modèles et dont l'expression est de la forme :

$$M(\ddot{X}) = -K(X) - Z(\dot{X}) \quad (1)$$

Où, le vecteur X contient les positions des éléments mobiles au temps t et les matrices M , K et Z contiennent les informations de masses, raideurs et viscosités propre au modèle. Nous pouvons également étudier cette équation afin d'obtenir les caractéristiques du modèle modal équivalent au modèle qu'elle définit. Les contraintes mathématiques nécessaires afin d'obtenir ce résultat sont importantes mais bien déterminées. Elles se fondent, selon la complexité du modèle CORDIS-ANIMA, sur certaines approximations essentiellement liées au processus de diagonalisation de matrices non nécessairement symétriques. Finalement, pour un modèle CORDIS-ANIMA caractérisé en raideurs, viscosités et composé de n inerties, nous obtiendrons un modèle modal associant n oscillateurs harmoniques indépendants, dont les paramètres (raideurs modales, viscosités modales et inerties modales) seront déterminés algébriquement et correspondront au comportement fréquentiel et temporel de la structure d'origine et donc du son qu'elle sera susceptible de produire. De plus, l'opération algébrique nous permet d'accéder à toute l'information relative aux déformées modales. Nous sommes donc à même de quantifier les

amplitudes relatives de chaque oscillateur harmonique et donc de chaque mode composant le phénomène sonore.

Ainsi, il existe un lien mathématique algébrique entre un modèle CORDIS-ANIMA, les composantes spectrales de son modèle modal équivalent et les paramètres acoustiques du phénomène sonore productible. Nous avons alors cherché à trouver une réciproque à cette logique afin de proposer une solution au problème inverse dont les données en entrées seraient les caractéristiques modales d'un phénomène sonore et dont le modèle CORDIS-ANIMA en sortie serait d'une nature « compacte ».

Si dans cette approche, l'entrée du problème inverse est relativement précise, sa sortie reste des plus vagues et nécessite face à un espace de solutions bien trop vaste, d'être contrainte. Comme évoqué dans la partie 2.1 à propos de la notion de déterminisme, deux causes peuvent avoir le même effet. En considérant que l'effet est ici l'enjeu, alors peu importe la cause, dès lors qu'une seule existe. Nous savons qu'un modèle à n masses a un modèle modal équivalent de n oscillateurs et donc n modes propres. Si nous avons comme données en entrée du problème inverse, trois vecteurs de n amplitudes, n fréquences et n temps d'amortissements alors nécessairement, le modèle générateur possède au moins n masses, et l'on peut supposer que n masses lui suffisent. En considérant cela, nous proposons de fixer une topologie (agencement d'un modèle CORDIS-ANIMA) au modèle générateur, celle d'un chapelet linéique de n masses, $n+1$ viscoélasticités et fixé en ses extrémités. En ce qui concerne la partie instrumentiste du modèle générateur, nous la reconsidérerons un peu plus tard. Cette problématique inverse réduite se résume alors à définir, via 3 vecteurs de n modes (ou fréquences calculées), n amplitudes et n temps d'amortissement renseignés par l'utilisateur, un objet CORDIS-ANIMA linéique générateur de type chapelet de masses reliées par des ressorts amortis :

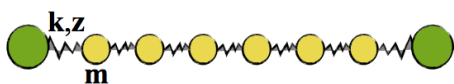


Figure 4. Modèle CA du chapelet.

Une telle topologie impose une certaine nature aux matrices M , K et Z définissant l'équation (1). M sera diagonale, K et Z seront tri-diagonales. Ces trois matrices sont les inconnues de notre problème.

Notre méthode de résolution sera dissociée en trois parties. Une première traitant les modes propres, une seconde traitant les amplitudes de ces modes et enfin, une troisième abordant leur temps d'amortissement. A chacune de ces étapes, le modèle de chapelet s'approche d'un modèle générateur du phénomène décrit.

Résolution en fréquences

Partant d'une réalisation expérimentale, puis au regard des équations liant les paramètres m , k et z aux

modes propres du modèle, nous avons constaté que la viscosité z avait un impact négligeable sur ces derniers. Elles seront ici négligées. Ainsi, les fréquences du phénomène sonore ne nous renseigneront que sur les matrices M et K du modèle générateur. La méthode mathématique utilisée est similaire à celle détaillée par G.M.L. Gladwell dans [10]. Elle repose sur la reconstruction d'une matrice Jacobienne (matrice tridiagonale comprenant des éléments diagonaux positifs et des éléments codiagonaux négatifs, ici assimilable à la matrice K des raideurs) par application de l'algorithme de Lanczos [11]. L'algorithme de construction d'une telle matrice demande, en plus du vecteur de n fréquences, d'être initialisé par un vecteur de n valeurs sur lequel nous reviendrons plus tard ainsi que par un rapport k_1/m_1 . Seront alors directement interprétables les matrices M , K et une matrice de passage contenant l'information sur les déformées modales du modèle.

Résolution en amplitudes

Dans le cadre de la modélisation physique, la notion d'amplitude résonne assez directement avec celle d'énergie. Et si l'on s'intéresse à l'amplitude des modes propres d'un modèle, il faut alors considérer que c'est la répartition de cette énergie parmi eux qui est déterminante. Autrement dit, lorsque nous parlerons d'amplitude de modes propres, nous ferons référence à l'amplitude relative des uns par rapport aux autres.

La partie instrumentale du modèle générateur, que nous avons précédemment caractérisée en raideurs et viscosités, est passive. Sans interaction, nul mouvement, sans mouvement, aucun phénomène sonore ne sera produit. Nous allons donc avoir à considérer un élément exciteur extérieur (instrumentiste), et l'interaction entre celui-ci et la partie instrumentale. Notre choix s'est porté sur un cas simple : une interaction par percussion entre une masse et l'une des masses du chapelet.

Nous voilà donc avec une structure, de topologie donnée aux paramètres fixés (masses et raideurs), possédant un spectre de fréquences modales précis, que l'on excitera par percussion. Nous voudrions alors pouvoir manipuler l'amplitude de chacune des composantes de ce spectre, afin de pouvoir contrôler l'enveloppe spectrale du son généré. Nous pouvons rapidement faire une analogie entre ce problème et celui des premiers facteurs de piano lorsqu'ils ont choisi de frapper les cordes de l'instrument à une certaine distance ($1/7$ et $1/9$ de la corde) afin d'enrichir son spectre d'harmoniques. L'amplitude de chaque mode est directement liée au(x) point(s) où l'on va agir sur le modèle. De plus, GENESIS ne capture pas l'ensemble du son produit par un modèle, mais procède à une écoute locale de ce dernier. Ainsi, le point d'écoute de notre structure sera un paramètre supplémentaire.

La solution mathématique à ce problème apparaît d'elle-même si nous revenons sur les résultats et conditions initiales de la résolution en fréquence. En effet, nous parlions précédemment d'un vecteur de n

valeurs nécessaire à l'initialisation de l'algorithme de Lanczos, ainsi que du calcul par ce même algorithme d'une matrice de passage contenant les déformées modales du modèle.

Ces deux éléments sont mathématiquement liés, le vecteur initial étant le premier vecteur colonne de la matrice de passage (qui contient les déformées modales en ligne). De plus, les déformées modales contiennent toute l'information nécessaire à l'interprétation des amplitudes relatives de chaque mode.

En somme, si nous excitons et écoutons notre modèle sur une masse particulière (ici la première), nous interpréterons un vecteur que nous avons possibilité de déterminer (en fonction des amplitudes des modes propres désirées par l'utilisateur), en amont de la résolution spectrale. Ces deux résolutions ne font alors qu'une.

Résolution en temps d'amortissement

L'analyse triviale d'un modèle simple comme par exemple le chapelet à 2 masses, nous permet de saisir quelles sont les contraintes imposées par la cohérence physique du temps d'amortissement d'un ou plusieurs modes. On constate en particulier que le second mode propre d'une telle structure ne peut avoir un temps d'amortissement supérieur à celui du mode fondamental. A moins de tolérer des valeurs de viscosités négatives. De plus, il est impossible de conserver l'élégance de la résolution en fréquence par l'algorithme de Lanczos lorsqu'on essaie de lui greffer les viscosités. Nous avons donc décidé de ne laisser libre que le choix du temps d'amortissement du mode fondamental afin d'obtenir la meilleure cohérence du modèle générateur final. Cette approche permet également de minimiser l'impact de la viscosité sur le spectre fréquentiel des modes du modèle.

Cette méthode permet finalement la résolution du problème inverse simplifié posé avec une efficacité algorithmique optimale et un résultat fiables au Hz prêt au delà de 40 modes. De plus, elle a déjà été mise en œuvre dans l'environnement GENESIS et a fait l'objet d'applications multiples en synthèse sonore.

5. CONCLUSION

Ce travail de définition du problème inverse, ainsi que les premières applications concrètes sur des cas simples, nous permettent d'asseoir une problématique des plus vastes et des plus complexes et d'en démontrer la pertinence grâce à de premiers résultats encourageants.

Les prochaines étapes sont d'ores et déjà posées clairement. L'une d'entre elles consistera, en s'appuyant sur une situation simple également, à séparer les contributions structurelles et événementielles du modèle de génération. Ce qui permettra d'entrer dans la problématique de la double identification « système

physique corporel » / « commande motrice » introduite au début de l'article.

6. REFERENCES

- [1] Adrien, J.M. "The Missing Link: Modal Synthesis", in G. De Poli, A. Picalli, and C. Roads, eds, *Representations of Musical Signals*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1991.
- [2] Arfib, D. "Digital Synthesis of Complex Spectra by Means of Multiplication of Nonlinear Distorted Sine Waves", *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol. 27, No. 7 : 757-768, 1979.
- [3] Cadoz, C., "Synthèse sonore par simulation de mécanismes vibratoires", Thèse de Doctorat, Spécialité Electronique - I.N.P.G. - Grenoble - France, 1979.
- [4] Cadoz, C., Luciani, A., Florens, J-L. "CORDIS-ANIMA : a modeling and simulation system for sound and image synthesis", *Computer Music Journal*, Vol. 17, No. 1 : 10-29, 1993.
- [5] Cadoz, C. "The Physical Model as Metaphor for Musical Creation. pico..TERA, a Piece Entirely Generated by a Physical Model", *Proceedings of ICMC'02*, Sweden, 2002.
- [6] Cadoz, C. "Supra-Instrumental Interactions and Gestures", *Journal of New Musical Research*, Vol. 38, No. 3 : 215-230, 2009.
- [7] Cadoz, C. « Timbre et causalité » In *Le timbre, métaphore pour la composition* (Barrière J.B.), Paris, Christian Bourgois 1991.
- [8] Castagne, N., Cadoz, C. "GENESIS: A Friendly Musician-Oriented Environment for Mass-Interaction Physical Modelling". *Proceedings of ICMC'02*, Sweden, 2002.
- [9] Chowning, J.M. "The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation", *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol. 21, No. 7 : 526-534, 1973.
- [10] Gladwell, G. M. L. "Inverse problems in vibration", 2nd édition, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [11] Lanczos, C. "An iteration method for the solution of the eigenvalue problem of linear differential and integral operators", 1950.
- [12] Nattiez, J.J., "Fondements d'une sémiologie de la musique", Union Générale D'édition, Paris, 1975.
- [13] Roads, C. "Granular Synthesis - Introduction", *Computer Music Journal*, Vol. 12, No. 2 : 11-13, 1988.
- [14] Schaeffer, P. "A la recherche d'une Musique Concrète", Seuil, Paris, 1952.
- [15] Smith, J.O. "Physical Modeling using Digital Waveguides", *Computer Music Journal*, Vol. 16, No. 4 : 74-91, 1992.
- [16] Tache, O. "Conception d'un Instrumentarium pour la création musicale à l'aide des modèles physiques CORDIS-ANIMA", PhD Thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, Octobre 2008