



Modèles et simulation en temps réel de corde frottée

Jean-Loup Florens, Claude Cadoz

► To cite this version:

Jean-Loup Florens, Claude Cadoz. Modèles et simulation en temps réel de corde frottée. Colloque de physique, 1er CFA, 1990, 1990, Lyon, France. pp.873-876. hal-00910535

HAL Id: hal-00910535

<https://hal.science/hal-00910535>

Submitted on 4 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.

MODÈLES ET SIMULATION EN TEMPS RÉEL DE CORDE FROTTÉE

J.-L. FLORENS et C. CADOZ

ACROE, Association pour la Création et la Recherche sur les Outils d'Expression, LIFIA, Laboratoire d'Informatique Fondamentale et d'Intelligence Artificielle, INPG, 46 Avenue Félix Viallet, F-38000 Grenoble, France

Résumé - La synthèse musicale par simulation de modèles physiques permet de retrouver les conditions du jeu instrumental. La qualité musicale obtenue dépend pour une part importante du mécanisme exciteur. Ce papier présente un modèle d'exciteur rendant compte des viscosités et adhérence non linéaires du couplage archet-corde et sa simulation en temps réel.

Abstract - Musical sounds synthesis with physical modeling gives a new access to intrumental playing. Musical quality is more dependent on excitation process. This paper presents an exciter model, and its real time simulation, which restitute the non linear viscosity and adherenoe existing in the bow-string coupling.

Introduction.

L'objectif de réintroduire le jeu instrumental dans un outil informatique de création musicale nous a naturellement conduits à introduire le modèle physique comme processus privilégié de génération du son (Cadoz 79). Le "noyau" d'un tel outil, dont une des réalisations est le système Cordis Anima, est un simulateur d'instrument constitué d'une part d'une machine de calcul intégrant l'équation d'évolution d'un modèle physique, et d'autre part de dispositifs liant le processus de calcul à l'action (gestuelle) et aux perceptions (auditive, visuelle, tactile) de l'instrumentiste.

A cette fonction centrale, qui implique à elle seule des moyens techniques lourds (calcul de simulation en temps réel, précision, puissance et rapidité des transducteurs), s'adjoignent différents outils d'aide à la construction de l'instrument. Cette dernière fonction s'appuie sur un système de modélisation de l'univers instrumental par assemblage de composants. Certains de ceux ci sont des représentants directs de constituants physiques. D'autres ont un statut plutôt fonctionnel. Une autre propriété du système est que l'algorithme nécessaire à la simulation puisse être construit par assemblage des algorithmes des composants, c'est ce que nous désignons par modularité algorithmique.

Les propriétés de l'instrument simulé.

La musicalité dépend à la fois des propriétés de l'instrument et de celles de l'action gestuelle. L'instrument doit donc présenter certaines propriétés de sensibilité au geste. Le mécanisme ou la fonction physique d'excitation y joue donc un rôle prépondérant. Dans le cadre d'une étude centrée sur les processus d'excitation, nous avons étudié récemment le problème de l'entretien de l'oscillation d'une structure vibrante dont l'exemple type est celui de l'archet. Les instruments à oscillation entretenue entrent dans la catégorie des systèmes non linéaires dissipatifs, en général complexes dès lors que la structure vibrante (corde, tube) présente un nombre de modes élevés. La dépendance des régimes d'oscillation, de leur apparition ou destruction ou de leur caractéristiques spectrales vis à vis des paramètres physiques contrôlables rend le dispositif propice à l'expressivité sur certains flots de l'espace des paramètres.

Modèle fonctionnel et simulation.

On caractérise le comportement de la collophane par une expression reliant la force tangente au glissement F_g à la vitesse de glissement V_g et à la force de pression de l'archet (P_p)

$$F_g = \frac{A \cdot P_p}{I + a v_g} \quad (1)$$

Ce modèle suffit à lui seul à expliquer l'oscillation mais on considère généralement qu'aux très basses vitesses de glissement peut se produire un effet d'adhérence c'est à dire marqué par une modification de nature de la force qui, de visqueuse (dépendant exclusivement de la vitesse), devient élastique c'est à dire dépendant de la position relative corde archet. Adrien (Adrien 89) souligne également l'importance du couplage de l'oscillation transversale, normale au déplacement de celui-ci, à l'oscillation principale.

La simulation réalisée tente de réunir certaines caractéristiques fonctionnelles qui nous paraissent prépondérantes pour conférer à l'instrument les propriétés d'expressivité souhaitées. Nous avons négligé pour le moment l'effet de couplage des deux directions d'oscillation de la corde et retenu la viscosité non linéaire ainsi que l'effet d'adhérence.

Ces deux propriétés sont modélisées par deux composants mécaniques non linéaires. Chacun d'eux est défini par un modèle exprimant une dépendance explicite (calculable) de la force d'interaction vis à vis des positions ou vitesses relatives des points matériels couplés. Dans leur réalisation algorithmique, les forces sont des entrées et les positions (vitesses) des sorties.

La simulation est construite par assemblage d'éléments dipolaires comme le montre la figure 1.

L'excitateur est constitué d'une masse liée d'une part à la structure vibrante par les deux éléments non linéaires en parallèle et d'autre part à un autre élément représentant la contrainte gestuelle extérieure, à travers un élément "liaison visco-élastique".

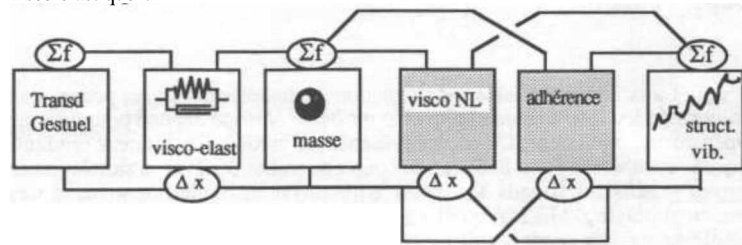


fig. 1

Ce schéma de construction est conforme au système Cordis. On y trouve 2 types de composants : les éléments matériels, masse, structure vibrante et dipôle extérieur, et les éléments liaisons (fig. 1).

Les premiers représentent une dépendance explicite d'une position (ou d'une vitesse) vis à vis d'une force. Dans les seconds, c'est l'inverse. Il est à noter qu'au module représentant la contrainte gestuelle n'est pas associé un algorithme de simulation mais le transducteur lui-même.

Nous décrivons dans la suite les éléments figurés constituant la simulation.

Le module "viscosité non-linéaire"

Il approche la caractéristique évoquée (1) par une fonction "linéaire par morceaux" (fig. 2). L'intérêt de ce type de fonction est algorithmique : seule la mémorisation des coordonnées des sommets est nécessaire. Le calcul de la forme (2) utilise l'opérateur "valeur absolue" peu coûteux.

$$F_g(v_g) = A F_p L k_{ak} (|v_g - S_k| \cdot |v_g + S_k|) + \alpha_0 v_g \quad (2)$$

La vitesse de glissement V_g est recalculée dans le module par dérivation de la différence des positions, et ce suivant le schéma numérique suivant (Euler) :

$$V_g = (1 - z^{-1}) (x_{masse} - x_{corde}) F_e \quad (3)$$

où z^{-1} représente l'opérateur "retard" d'un échantillon et F_e la fréquence de calcul.

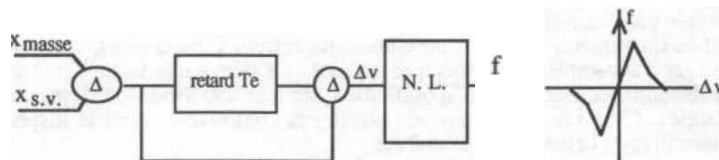


fig. 2

Le module d'adhérence.

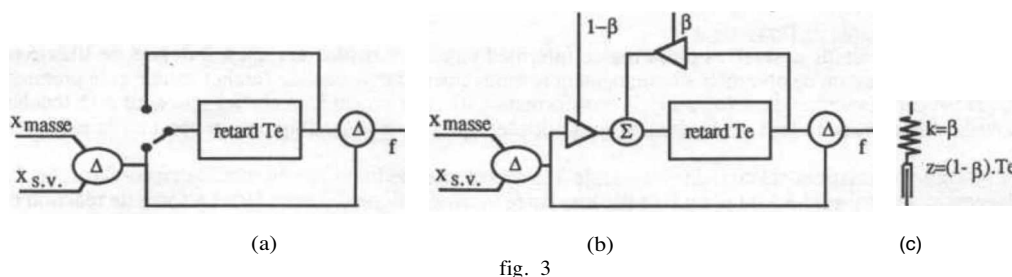
Le modèle visqueux précédent est peu satisfaisant aux très faibles vitesses où il équivaut à une viscosité linéaire alors que la forte discontinuité à l'origine de la caractéristique (1) traduit l'apparition d'une force non visqueuse.

On représente ici cet effet par une commutation entre deux régimes, correspondant chacun à une modélisation partielle du système. En l'occurrence, on décrira la force comme dépendante de la vitesse dans un cas, de la position dans l'autre. Il est alors nécessaire d'ajouter au modèle un élément supplémentaire pour contrôler la commutation entre les régimes.

Ce type de modélisation a été formalisé et introduit dans Cordis pour traiter de manière relativement exhaustive la représentation des interactions non linéaires. Un modèle de frottement d'archet a pu ainsi être décrit et simulé (Cadoz 79, Lacomerie 80).

Ce modèle utilise la commutation entre un régime élastique et un régime libre (force nulle). Le régime élastique apparaît lorsque la vitesse devient inférieure à un seuil, et disparaît quand la force dépasse une certaine valeur. A l'apparition du régime élastique, un ressort s'établit dans des conditions telles qu'il n'introduise aucune force à cet instant là. Pour cela les points d'attache de ce ressort doivent être redéfinis à chaque commutation.

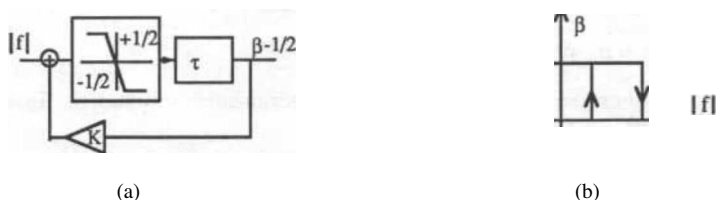
Le modèle proposé ici reprend ce principe en le simplifiant par une formulation directe en temps discrétisé. On peut construire un module de liaison visqueuse linéaire à entrée position à partir du schéma de dérivation (2). La commutation de l'entrée du module "retard" sur sa propre sortie transforme la viscosité en élasticité avec les conditions de continuité souhaitées fig 3a.



L'introduction d'un paramètre $\sim$ variant continuellement entre 0 et 1 fournit une représentation pour le régime transitoire sous la forme d'un passe bas (fig. 3b) du 1er ordre et de constante de temps: $T = -Te / \log \sim$. Son image physique est celle de la visco-élasticité fluide (fig.3c), modèle dans lequel les points d'attache du ressort n'ont pas à être définis.

Le module contrôlant le paramètre $\sim$ est réalisé à partir d'un élément non linéaire défini par une fonction continue à points limites +1 et -1 (fig 4).

Les conditions de commutation ou de modification du paramètre $\sim$ portent sur la grandeur de sortie du module "liaison" contrôlé puisque en régime visqueux, celle-ci est proportionnelle à la vitesse. Ainsi, le module de contrôle ne comportera-t-il qu'une entrée.



Cet élément est placé dans une boucle de contre-réaction positive qui lui confère deux états stables. Le module comporte alors 3 paramètres: Le gain K de la boucle de réaction, la pente à l'origine de l'élément non-linéaire $\dot{\sim}$ et le seuil moyen S . Ces trois paramètres permettent de régler indépendamment les deux seuils de commutation et une constante de temps de la forme

$$\tau = Te / 10g(\dot{\sim}.K)$$

caractérisant la vitesse de commutation. Plus généralement on pourrait affiner les propriétés dynamiques de la commutation en agissant sur la forme de la caractéristique non-linéaire ci dessus. La force visqueuse résiduelle produite aux vitesses élevées peut être compensée grâce au terme $O\{v\}$ du module visqueux (2).

Remarques

La représentation par commutation de modèle viole le principe de permanence de la structure. Elle correspond cependant à une démarche à la fois naturelle et puissante car elle permet de traiter des cas complexes à partir de modèles de base extrêmement simples. Une fois le schéma de commutation établi, il nous paraît utile de rechercher deux conditions: tout d'abord une unification des modèles partiels qui transforme la commutation de structure en variation de paramètre, représentation qui assure les conditions de continuité à la commutation.

Ensuite, le principe de permanence de la structure doit conserver un sens localement. Pour cela la fréquence de commutation ou la bande passante du paramètre contrôlé doivent demeurer faibles.

La structure vibrante.

Nous utilisons un modèle modal à deux points de couplage. L'un de ces points permet le couplage aux éléments décrits ci dessus, le second est utilisé pour la production du signal sonore.

L'implantation permet la simulation d'environ 10 modes à 44 kHz.

La forme modale, dont les propriétés sont maintenant reconnues (Florens 86, Adrien 89), permet de rechercher des propriétés des modules d'entretien, dans un contexte autre que celui du modèle classique non dispersif de corde ou de tube, notamment parmi les structures comportant un nombre de modes faibles. De plus, dans le cas de l'entretien par viscosité non-linéaire (sans adhérence), l'espace d'état du système demeure identique à celui de la structure vibrante isolée.

Les autres constituants de l'excitateur.

Il s'agit du transducteur gestuel, et de la masse intermédiaire. Le transducteur est à 2 degrés de liberté de déplacement permettant de contrôler simultanément le mouvement transversal de l'archet simulé et la pression. Il est réalisé par adjonction d'un dispositif de transformation du mouvement à un clavier rétroactif à 16 touches (Lisowski 88) dont deux touches seulement sont utilisées, qui permet de manipuler un point mobile dans un plan.

Le déplacement horizontal de ce point est couplé à la masse intermédiaire par un module visco-élastique. Le déplacement vertical est lié à un point fixe par une butée visco-élastique (Florens 89). La force de réaction de cette butée agit sur un coefficient de gain appliqué en sortie des modules d'interaction "archet-structure vibrante". Nous simulons ainsi de manière sommaire l'effet de pression d'archet.

Implantation - fréquences de calcul

La structure décrite a été scindée en deux blocs qui sont traités à des fréquences de calcul différentes mais synchrones d'une même horloge. La frontière entre ces deux blocs se situe au niveau du module visco-élastique liant le transducteur à la masse intermédiaire. La partie lente (liaison transducteur-masse, butée verticale) est traitée à 1,1 kHz, l'autre à 44kHz. Cette technique ne nécessite pas de filtres anti-repliement.

Conclusion.

La simulation présente une large variété de comportements pertinents. L'une des propriétés intéressante est de regrouper dans les mêmes conditions d'évaluation les modèles visqueux et adhérents et leurs combinaisons.

Bibliographie.

ADRIEN J.M. 1989 - Simulation numérique de systèmes vibrants complexes. Application à la synthèse sonore par modélisation physique. Thèse de doctorat Université Paris VI

BOUASSE H. 1926 - Cordes et membranes Delagrave, Paris.

CADOZ (C.), 1979 - Synthèse sonore par simulation de mécanismes vibratoires. Thèse de Doctorat Electronique I.N.P.Grenoble.

CADOZ (C.), LUCIAN! (A.) et 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, pp. 279-292.

FLORENS (J.L.), LUCIAN! (A.), CADOZ (C.), 1986 - Optimized real-time simulation of objects for musical synthesis and animated images synthesis. ICMC La Haye 1986

FLORENS (J.L.) 1989 "Le modèle physique - Simulation de l'univers instrumental" - in "Sound Représentation" - MIT Press - 1989 - à paraître.

LISOWSKI (L.), CADOZ (C.), FLORENS (J.L.) 1988 - "Clavier rétroactif modulaire et actionneur modulaire plat" - Brevet d'invention français N°88 14064

LACORNERIE (P.) 1980 - "Etude d'un modèle de frottement d'archet collophané" - Rapport interne ACROE.