

Étude du plectre de clavecin : modélisation et résultats expérimentaux

A. Roy^{a,b}, J.-L. Le Carrou^a, B. Fabre^a, M.-A. Vitrani^b

a. Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, UMR CNRS 7190, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Équipe LAM, F-75015 Paris, France

roy@lam.jussieu.fr

b. Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, UMR CNRS 7222, Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique, F-75005 Paris, France

Résumé :

Le clavecin est un instrument à cordes pincées dont la mécanique peut être décrite simplement. Les plectres sont notamment modélisés par des poutres de type encastrée-libre classiques, avec une section constante le long de leur fibre neutre. Pourtant, le processus d'harmonisation réalisé par le facteur, c'est-à-dire l'ensemble des opérations qui donnent au clavecin une réponse uniforme sur toute sa tessiture, semble montrer que la géométrie réelle des plectres, qui a été négligée jusqu'à présent dans leur description, est primordiale pour obtenir un modèle satisfaisant de l'interaction qui a lieu entre ceux-ci et les cordes. Un dispositif expérimental mettant en œuvre un doigt robotisé permet de valider cette hypothèse avant de poursuivre plus loin dans cette voie.

Abstract :

The harpsichord, which belongs to the plucked strings family of instruments, has a straightforward mechanism description. Plectra are modeled as classical cantilever beams with constant sections along the neutral axis. However, the voicing process done by the instrument maker, composed of the tuning steps performed to give the instrument an uniform response over its tessitura, seems to show that the plectra real shapes, that used to be neglected, are very important and must be taken into account to build a valid model of the plectrum / string interaction. An experimental setup is used to validate theoretical results coming from this hypothesis before going ahead in this path.

Mots clefs : clavecin, poutre à section variable, doigt robotisé

1 Introduction

Le clavecin est un instrument dont le mécanisme de pincement des cordes peut être décrit de la manière suivante : lorsque le musicien appuie sur une touche du clavier, un sautereau en bois ou en plastique qui repose au bout de celle-ci s'élève et entraîne dans son mouvement un plectre qui va pincer la corde. Les modèles de la littérature supposent que le sautereau, et donc le plectre, montent à vitesse constante [1]–[3], ce qui a été vérifié expérimentalement en situation de jeu [4]. Ces modèles se sont focalisés sur le plectre et sa déformation au cours de son interaction avec la corde, mais aucun n'a pris en compte leur géométrie jusqu'à présent. Dans cet article, on s'intéresse tout particulièrement à l'harmonisation du clavecin, en particulier à l'étape de taillage des plectres. L'harmonisation a pour but de rendre uniforme la sensation haptique et sonore perçue par le musicien sur l'ensemble de la tessiture de l'instrument. Le facteur peut agir sur plusieurs paramètres comme la hauteur initiale du sautereau, la position des feutres pour étouffer les cordes, les feutres des butées et la forme des plectres. La question à laquelle on souhaite répondre est la suivante : comment une variation infime de géométrie peut-elle modifier l'effort ressenti par le musicien lorsqu'il joue ? Pour y répondre, nous proposons un modèle global de touche de clavecin décomposé en trois parties : un modèle de solides rigides sans frottements pour la touche, une amélioration des modèles de plectres existants et un modèle de corde très simple pour simuler l'interaction.

Afin de valider expérimentalement nos résultats, une plate-forme robotisée a été utilisée [5]–[7] afin de reproduire des conditions initiales simples et maîtrisées sur la touche du clavecin.

L'article est organisé de la manière suivante : le modèle de la touche de clavecin est présenté puis la plate-forme robotisée est rapidement détaillée avant de décrire l'expérience. Enfin, les résultats du modèle sont comparés aux observations expérimentales et à un modèle précédent pour constater les améliorations apportées.

2 Modèle du mécanisme de pincement du clavecin

Le modèle proposé est décomposé en trois parties. On présente tout d'abord le modèle de la touche, puis le modèle de plectre et le modèle de corde. Enfin, la manière dont ceux-ci interagissent est détaillée.

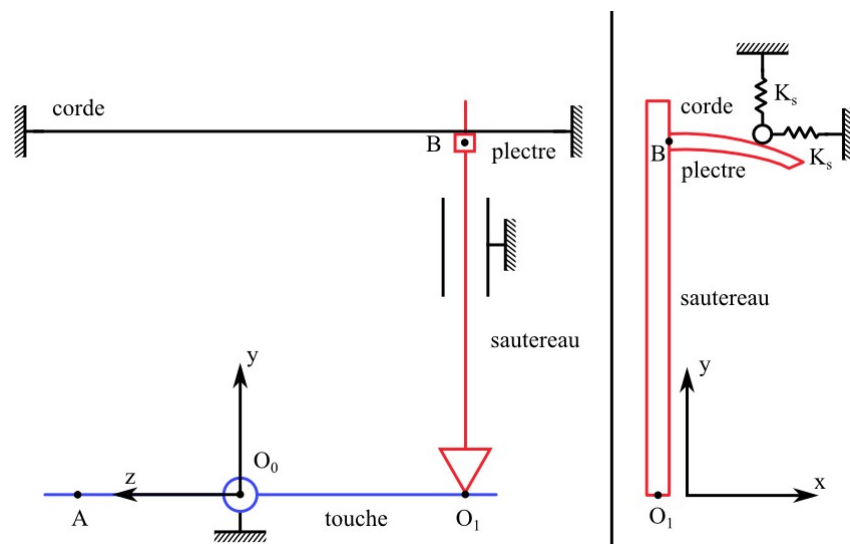


Figure 1 : Le schéma de gauche représente la modélisation de la touche avec les liaisons cinématiques. Le point A représente le point de contact entre le musicien ou le robot et la touche. Le point B est le point d'encastrement du plectre. Le schéma de droite représente la modélisation du mouvement du tronçon de corde sur le plectre.

Le mécanisme est composé de deux solides : la touche et le sautereau. La touche est reliée au bâti par une liaison pivot et au sautereau par une liaison ponctuelle en O_1 . Le sautereau est relié au bâti par une liaison glissière (voir figure 1). Les solides sont supposés indéformables, les liaisons parfaites et sans frottements. Le doigt du musicien qui appuie sur la touche est modélisé par un effort ponctuel en un point A de celle-ci. Le contact du doigt sur la touche est supposé sans frottements. Le plectre est ici réduit à son point d'encastrement B sur le sautereau et son effet est le torseur résultant qui agit en ce point. On déduit de cette description l'équation de mouvement qui relie l'effort exercé au niveau de l'encastrement du plectre par la corde à l'effort exercé par le musicien. Les modèles de plectre proposés dans la littérature ont évolué de manière incrémentale. Le premier modèle [1] propose d'approcher la déformation du plectre par le mouvement d'un ensemble de barres articulées entre elles par des liaisons pivot. Puis une fonction approchant la déformée a été proposée [3]. Plus récemment un véritable modèle de poutre a été utilisé [2]. Aucune de ces approches ne tenait compte de la géométrie réelle des plectres. La première tentative dans ce sens a été réalisée dans [4]. Cet article propose un modèle qui hérite directement des caractéristiques des modèles précédents en proposant un modèle de poutre analytique à section variable. Les hypothèses sont les suivantes : le plectre est en approximation linéaire, encasté à une extrémité dans le sautereau et soumis à un effort appliqué par la corde à l'autre extrémité.

Le modèle de corde est le suivant : on s'intéresse au mouvement du tronçon infinitésimal en contact avec le plectre. Ce tronçon est relié au bâti par deux ressorts linéaires de raideur K_s , dirigés selon les vecteurs \vec{x} et \vec{y} , limitant ainsi son mouvement dans un plan (voir figure 1). On suppose qu'il n'y a aucun couplage entre les ressorts. L'ensemble forme un système masse-ressort à deux degrés de liberté, très légèrement amorti pour stabiliser la solution obtenue.

Le modèle proposé dans cet article résulte du fonctionnement interactif des trois ensembles décrits précédemment, lors de l'action de la touche. Le mouvement d'entrée est la montée du sautereau à vitesse constante qui engendre une déformation du plectre. Cette déformation est utilisée pour calculer le mouvement de la corde qui glisse sans frottement sur le plectre. Le déplacement du tronçon de corde permet donc de calculer, à l'équilibre, l'effort qu'il exerce sur le plectre au niveau de son encastrement et donc de calculer l'effort ressenti par le musicien sur la touche. Cette succession d'états quasi-statiques n'est valide que jusqu'à l'instant où la corde s'échappe du plectre.

3 Plate-forme robotisée & validation expérimentale

Le doigt robotisé possède deux liaisons pivot lui permettant de contrôler le mouvement de son effecteur dans un plan (robot 2R plan). Il a été conçu selon un cahier des charges précis d'après l'analyse du geste de musiciens [7], [6]. Il est capable de développer des efforts de 20 N maximum dans un espace de 2 cm² à une vitesse maximale de 1,5 m/s. Le robot peut reproduire des trajectoires mesurées d'après le mouvement des doigts humains. Il peut aussi effectuer des trajectoires non réalistes qui permettent de contrôler finement et de manière répétable certains paramètres souhaités. Ici, le robot sert à donner à la touche un mouvement bien particulier, qui impose au sautereau une vitesse de montée constante.

Afin de mesurer les efforts que le robot applique sur la touche de clavecin, l'effecteur possède une partie déformable sur laquelle sont collées des jauges de contraintes. Elles sont disposées de manière à donner les efforts appliqués sur le doigt dans deux directions orthogonales. Le capteur a été calibré et permet d'obtenir les efforts au cours du jeu, ce qui permet de mesurer expérimentalement l'effort au niveau de la touche au point d'appui.

Le robot est placé sur la touche n°37 (Sol) d'un clavecin d'expérimentation. La vitesse imposée au sautereau est contenue dans la plage des vitesses mesurées sur un claveciniste en cours de jeu [4]. Une caméra rapide filme à une fréquence de 10000 Hz la déformation du plectre d'une longueur de 3,5 mm. Les images sont synchronisées avec les signaux de déplacement de la touche ainsi que ceux du capteur d'effort du robot. Le dispositif expérimental est présenté dans la fig.2.

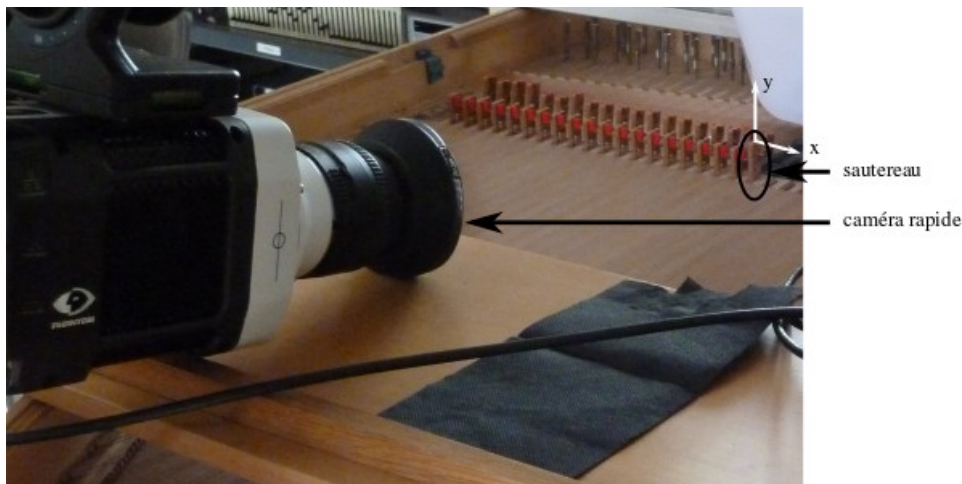


Figure 2 : Montage expérimental. Le plectre étudié se trouve sur le sautereau entouré. Les axes indiqués sont ceux du plan dans lequel le mouvement de la corde est décrit.

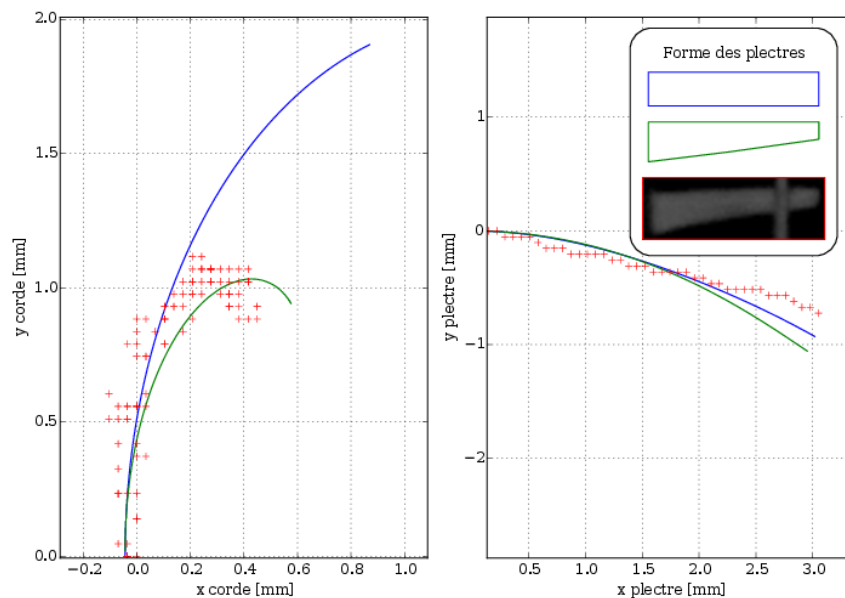


Figure 3 : Le graphe de gauche représente la trajectoire du tronçon de corde pendant l'appui sur la touche à partir de l'instant de contact entre le plectre et la corde en $(0, 0)$ jusqu'à l'instant de lâcher. Le graphe de droite représente les plectres déformés à l'instant de lâcher. Le modèle de poutre classique (bleu) est comparé au modèle de poutre à section variable (vert) et aux données expérimentales (rouge).

Lorsque l'on compare les données obtenues lors de cette expérience avec les résultats des modèles d'interaction plectre/corde, on constate que la prise en compte de la géométrie du plectre a une grande importance. En effet, la figure 3 montre le déplacement de la corde obtenu expérimentalement (en rouge) et simulé par deux modèles de plectre: la courbe bleue correspond à un modèle de plectre à géométrie rectangulaire et la courbe verte correspond au modèle de poutre à section variable, dont la géométrie approche le mieux possible la forme du plectre utilisée. Les déplacements ont été ramenés au point origine pour une meilleure comparaison. Bien que les modèles ne correspondent pas exactement aux données expérimentales, ce qui s'explique par la connaissance approximative de certains

paramètres comme le module de Young du plectre utilisé, on constate que la courbe bleu ne présente pas d'inflexion en $x \approx 0,25$ mm lorsque la corde est proche de l'extrémité du plectre et s'apprête à être relâchée. Ce comportement particulier peut être expliqué par la réduction de la section du plectre lorsque l'on se rapproche de son extrémité libre : le plectre offre une moindre résistance à la corde et sa flèche augmente plus vite que ne monte son extrémité encastree.

5 Conclusion

Cet article présente un modèle mécanique d'une touche de clavecin dans le but de mieux comprendre l'effet de la géométrie du plectre, qui est l'un des effets de l'harmonisation, sur le toucher du musicien et l'interaction entre la corde et le plectre. Une expérience a été mise en place pour vérifier la validité de ce modèle : un doigt robotisé impose à la touche choisie une trajectoire particulière qui donne une vitesse de montée constante au sautereau. La comparaison du déplacement de corde théorique au déplacement mesuré montre en effet que la géométrie du plectre a un fort impact sur la trajectoire suivie par la corde. Cela donne des résultats satisfaisants pour la poursuite de l'étude avec des plectres de différentes formes. On peut aussi envisager l'identification de certaines caractéristiques physiques des plectres à travers le modèle par simple optimisation de celui-ci par rapport à des données expérimentales.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet Fa-Re-Mi qui bénéficie d'une aide de l'État français gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre de l'Idex Sorbonnes Universités dans le cadre du programme Investissements d'avenir portant la référence ANR-11-IDEX-0004-02. Les auteurs remercient chaleureusement tous les acteurs de ce projet dont le laboratoire du musée de la musique.

Références

- [1] D. H. Griffel, The Dynamics Of Plucking, J. Sound Vib., vol. 175, n° 3, pp. 289-297, 1994.
- [2] C.-Y. J. Perng, J. Smith et T. Rossing, Physical Modeling of the Harpsichord Plectrum-string Interaction, Proceedings of the 13th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-10), 2010.
- [3] N. Giordano et J. P. Winans II, Plucked Strings and the Harpsichord, J. Sound Vib., vol. 224, n° 3, pp. 455-473, 1999.
- [4] D. Chadeaux, J. L. Le Carrou, S. Le Conte et M. Castellengo, Analysis of the harpsichord plectrum-string interaction, SMAC-SMC, pp. 155-160, 2013.
- [5] D. Chadeaux, J.-L. Le Carrou, M.-A. Vitrani, S. Billout et L. Quartier, Harp plucking Robotic Finger, IEEE RJS Int. Conf. Intell. Robots Syst., pp. 4886-4891, 2012.
- [6] J.-L. Le Carrou, D. Chadeaux, M.-A. Vitrani, S. Billout et L. Quartier, DROPIC : A tool for the study of string instruments in playing conditions, Acoustics, 2012.
- [7] D. Chadeaux, A. Roy, J.-L. Le Carrou, B. Fabre et M.-A. Vitrani, Bio-inspired robot to study stringed instruments: application to the harp, SMAC-SMC, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2013.