



**HAL**  
open science

## Modélisations mécaniques de la touche de piano et de son imitation haptique

José Lozada, Xavier Boutillon, Moustapha Hafez

► **To cite this version:**

José Lozada, Xavier Boutillon, Moustapha Hafez. Modélisations mécaniques de la touche de piano et de son imitation haptique. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, 2007, Grenoble, France. 6 p. hal-00170229

**HAL Id: hal-00170229**

**<https://hal.science/hal-00170229v1>**

Submitted on 17 Oct 2022

**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.

## Modélisations mécaniques de la touche de piano et de son imitation haptique

José Lozada\*<sup>†</sup>, Xavier Boutillon\* & Moustapha Hafez<sup>†</sup>

\*Laboratoire de Mécanique des Solides, CNRS - UMR 7649, Département de Mécanique, École Polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex, France

<sup>†</sup>CEA LIST, 18 route du panorama, 92265 Fontenay-aux-Roses Cedex  
jose.lozada@cea.fr; lozada@lms.polytechnique.fr

### Résumé :

*Le toucher d'un piano est une information sensorielle essentielle pour le contrôle de la nuance de jeu. Elle provient de la dynamique complexe du mécanisme d'actionnement qui transmet l'énergie mécanique du doigt au marteau. Les pianos numériques mettent en œuvre des claviers qui ne reproduisent pas les finesses du toucher d'un piano traditionnel. Afin de palier cette défaillance, nous avons réalisé une interface haptique semi-active capable de reproduire le toucher du piano traditionnel. Ceci nécessite une modélisation fine du comportement dynamique du système traditionnel. Nous présentons le modèle dynamique de la touche de piano ; ses simulations sont comparées aux mesures de la réponse du système sous l'action du doigt. L'interface haptique est composée d'un levier auquel est appliqué un système d'amortissement actif à base de fluide magnéto-rhéologique (MRF). Nous présentons le modèle de l'interface ; ses simulations sont comparées à la réponse du système sous l'action du doigt.*

### Abstract :

*The tactile feedback of a traditional acoustical piano is essential for a precise control of musical phrasing. It is the result of the dynamical behaviour of the piano action which transmits the motion of the key to the hammer. The action mechanisms used in numerical pianos are much simpler but the result is less satisfactory in terms of tactile feedback. We present first the dynamical model of the traditional piano action. The response of the system is compared to the simulation results. Next we propose the scheme of a haptic interface based on a lever and an active damping system using magneto-rheological fluid. The simulation of this interface is compared with the prototype.*

### Mots-clefs :

## Interface haptique, fluide magnéto-rhéologique, modélisation dynamique

### 1 Introduction

La réponse dynamique de la mécanique d'actionnement traditionnelle de piano est responsable du toucher procuré par le clavier. Cette information sensorielle est précieuse pour le contrôle fin de la nuance de jeu. Les modèles dynamiques simplifiés (Dijksterhuis (1965), Oledski (1972), Hayashi *et al.* (1999)) réduisent le système à un ou deux degrés de liberté. Les prototypes de clavier à retour d'effort (Cadoz *et al.* (1990), Gillespie (1996)) ainsi que des systèmes commerciaux dits « à toucher réaliste » (Meisel (2003)) ne sont pas encore totalement convaincants soit dans leur aptitude à reproduire de manière satisfaisante le toucher d'un piano traditionnel soit dans leur mode de réalisation et de commande. Nous avons réalisé un système actif capable de reproduire avec une bonne précision le comportement de la mécanique traditionnelle. Pour cela, nous avons élaboré un modèle dynamique complet de la mécanique traditionnelle en vue de l'implémenter dans une interface haptique contrôlée en temps réel. Le système haptique proposé contrôle la force opposée par le clavier au pianiste lors de l'appui sur la touche. Il utilise pour cela un fluide magnéto-rhéologique. Les fluides magnéto-rhéologiques sont des suspensions de particules ferromagnétiques de quelques micromètres ( 10 - 50 $\mu$ m).

Sous l'action d'un champ magnétique, les particules s'alignent sur les lignes de champ. La viscosité apparente du fluide est alors fonction de l'intensité du champ magnétique. Deux modes principaux d'opération peuvent être dégagés (Jolly *et al.* (1998), Ahmadian (2002)). Le mode valve suppose un flux de fluide au travers d'une zone active (souvent rétrécie). Ce mode, souvent utilisé dans la conception d'amortisseurs semi-actifs, permet d'obtenir de grandes raideur et amortissement. Pour une utilisation haptique, son principal inconvénient vient de la nécessité de joints d'étanchéité qui occasionnent des forces de frottement non négligeables par rapport aux forces à contrôler. Le mode de cisaillement des chaînes de particules est basé sur le mouvement relatif des pôles magnétiques ; il est utilisé pour les freins et embrayages et convient mieux à l'interface haptique pour claviers musicaux.

Cette communication présente d'une part, la construction du modèle dynamique de la touche traditionnelle et sa simulation et d'autre part, la conception de l'interface haptique, sa modélisation et sa simulation.

## 2 Une interface haptique : module élémentaire d'un clavier musical

La figure 1 montre l'interface « touche de piano ». Elle comporte trois parties principales : la structure mécanique mobile, le système actif de commande d'effort et l'instrumentation. La

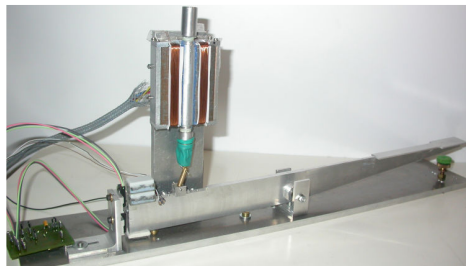


FIG. 1 – Interface haptique du piano pour une touche. Lorsque le doigt appuie sur la touche, le mouvement de rotation est transformé en mouvement de translation de la plaque magnétique grâce à la bielle. La plaque cisaille le fluide contenu dans l'entrefer.

structure mécanique est composée d'une touche, d'une bielle et d'un bâti, reliés par des liaisons pivot. La touche est en aluminium et possède les mêmes caractéristiques de masse et d'inertie que la touche traditionnelle en bois. Les butées avant et arrière sont identiques à celles de la mécanique traditionnelle. La bielle permet de transmettre le mouvement de la touche à l'élément mobile sur lequel agit le fluide magnéto-rhéologique. Le système actif associe circuit magnétique (1), l'élément mobile (2), un système d'étanchéité (3) et un guidage (4) le tout fixé sur le bâti (5). (figure 2) Le circuit magnétique est composé de deux noyaux ferromagnétiques en forme de U et de deux bobines de 100 tours. L'assemblage ménage un entrefer de 1mm où se déplace une plaque magnétique allongée. La partie mobile est composée par une plaque magnétique qui coulisse dans l'entrefer. Deux bagues et deux tiges de part et d'autre de la plaque en assure le guidage. La cavité étanche contenant le fluide magnéto-rhéologique est formée par la pièce (c), les pôles magnétiques, un bouchon supérieur, une bague inférieure et d'une membrane flexible (non représentée sur la figure). La membrane est fixée d'une part sur la bague inférieure et d'autre part sur la tige inférieure de la partie mobile. La membrane permet le mouvement de translation de la plaque dans le fluide en assurant l'étanchéité et en minimisant les frottements. L'interface est instrumentée par des accéléromètres MEMS (Analog Devices ADXL103) et deux capteurs de position à effet Hall qui permettent de calculer l'accélération,



FIG. 2 – Système actif, a) Vue d'ensemble b) Élément mobile c) Système d'étanchéité d) Vue en coupe du circuit magnétique

vitesse et position angulaires de la touche. Pour l'étude nous avons aussi utilisé un capteur de force Kistler piézoélectrique. Le contrôle du courant dans les bobines permet de contrôler la force qui résiste au déplacement de la touche : une tension de consigne donnée par le modèle simulé en temps réel, impose un courant dans les bobines ce qui génère un champ magnétique dans l'entrefer. Sous l'action de ce champ magnétique, la viscosité apparente du fluide magnéto-rhéologique change ce qui permet de contrôler la résistance mécanique au déplacement de la plaque magnétique. Le schéma de commande intègre les comportements de système à simuler (la touche traditionnelle) et du système haptique décrit ci-dessus.

### 3 Modélisation mécanique de la touche traditionnelle

La mécanique d'actionnement du marteau de piano transforme le mouvement du doigt en vitesse d'impact du marteau sur les cordes, au moyen d'un système complexe de bras de levier. Le retour sensoriel permet au pianiste d'avoir une perception fine du geste effectué. La figure 3 montre le mécanisme d'actionnement traditionnel. Il est constitué de six pièces en rotation : la touche, l'étouffoir, le chevalet, le bâton d'échappement, le levier de répétition et le marteau. Nous considérons toutes ces pièces comme solides. Nous nous intéressons uniquement au mou-

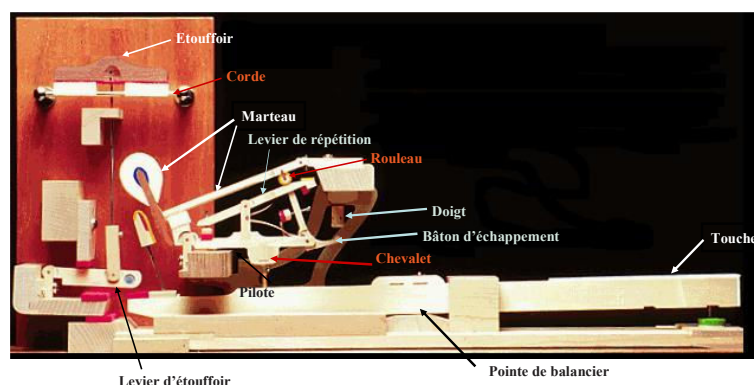


FIG. 3 – Mécanique d'actionnement traditionnelle

vement de descente de la touche sous l'action du doigt. Ce mouvement peut être décomposé en deux phases :

- La touche pivote sur la pointe de balancier. À mi-course, elle rencontre le levier d'étouffoir qui est ensuite entraîné par la touche. Elle entraîne également le chevalet qui pivote par rapport au bâti. Dans cette première phase, chevalet, levier de répétition et bâton d'échap-

pement sont solidaires et poussent le marteau, en rotation par rapport au bâti. Cette phase s'achève lorsque le bâton d'échappement et le levier de répétition atteignent leurs butées respectives (simultanément pour une mécanique bien réglée).

- Le chevalet continue son mouvement d'ascension tandis que le bâton et le levier pivotent autour des axes fixés sur le chevalet. Le levier n'est plus en contact avec le marteau que le bâton seul continue de pousser. Le contact entre le bâton et sa butée ralentit la progression de l'ensemble chevalet, bâton, levier, ce qui provoque l'échappement du marteau si l'énergie cinétique qu'il a acquise est suffisante. Le marteau parvient librement à la corde et la touche est arrêtée dans son mouvement sur la mouche.

Les relations entre pièces sont représentées sur la figure 4 : liaisons pivot avec frottement de type Coulomb (solide et visqueux), contacts unilatéraux (feutre) avec ou sans glissement et ressorts de rappel. Le système comprend six degrés de liberté (touche, étouffoir, chevalet, bâton, levier et marteau).

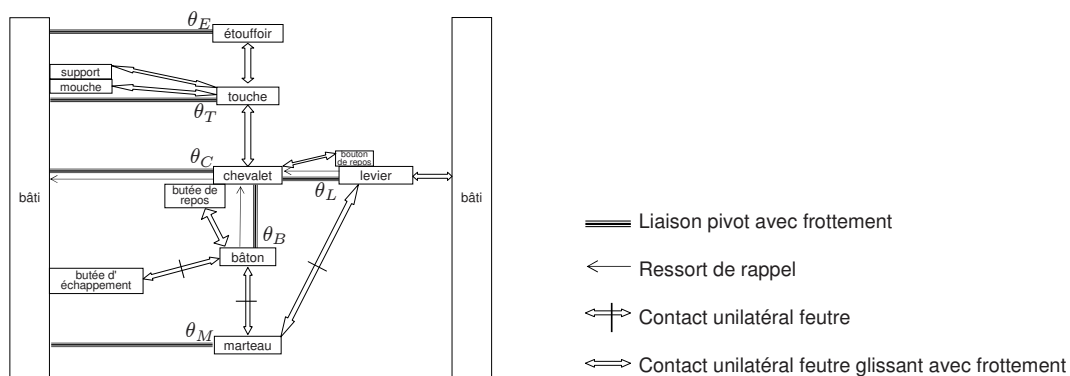


FIG. 4 – Schéma des relations entre pièces constitutives de la mécanique de piano

ton, levier et marteau) dont deux sans inertie significative (bâton et levier). On leur associe des variables d'espace ( $\theta_T$ ,  $\theta_E$ ,  $\theta_C$ ,  $\theta_B$ ,  $\theta_L$ ,  $\theta_M$ ) régies par six équations différentielles du second ordre (théorème fondamental de la dynamique) couplées par les forces de liaison. Les forces transmises par les liaisons pivot bâton-chevalet et levier-chevalet interviennent dans l'équation du moment du chevalet. Elles sont calculées en utilisant le théorème de la résultante des forces sur le bâton et le levier. La description d'un contact unilatéral fait intervenir l'équation de comportement du feutre, une loi de glissement éventuelle et la fermeture géométrique du système. Dans le plan du mécanisme et sans préjuger des approximations à faire sur chaque liaison, cette description fait donc intervenir deux composantes de force et deux grandeurs d'espace (compression du feutre et glissement). Le système non linéaire d'équations différentielles ainsi obtenu peut être résolu en utilisant, par exemple, les équations différentielles pour calculer les mouvements et les équations de couplage pour calculer les forces.

L'objectif du modèle est de calculer la force opposée par la touche au pianiste. Nous avons mesuré la force exercée par le doigt sur la touche lorsque le pianiste joue une note, ainsi que le mouvement de la touche. Ce mouvement sera considéré comme le signal d'entrée du modèle. La figure 5 permet de comparer la mesure de la force au résultat de la simulation (Simulink) pour un mécanisme dont on a supprimé l'étouffoir et neutralisé le levier de répétition. Dans la mesure où aucun paramètre du modèle n'est ajusté pour faire coïncider ces courbes et dans la limite des approximations du modèle (feutres de butée considérés comme infiniment durs) cette comparaison apparaît comme satisfaisante.

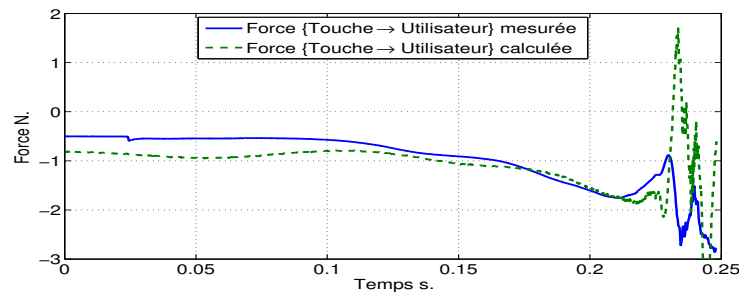


FIG. 5 – Comparaison simulation - expérimental pour le modèle simplifié

#### 4 Modélisation de l'interface haptique

La figure 6 indique comment les comportements mécanique, magnétique et électrique du système haptique interagissent. De manière analogue mais considérablement plus simple que la

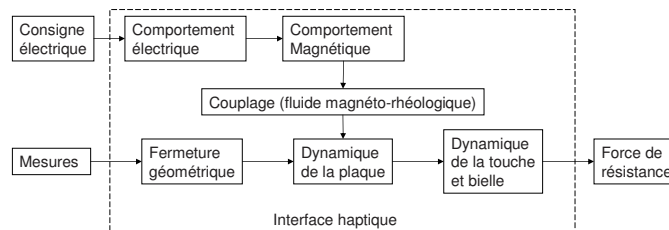


FIG. 6 – Schéma fonctionnel de l'interface haptique

mécanique de piano :

- La fermeture permet de calculer le mouvement de la plaque en fonction du mouvement de la touche.
- L'application à la plaque des lois de la dynamique permet de calculer la force exercée par la partie active sur la bielle.
- La dynamique de l'ensemble {touche + bielle} donne la force de résistance appliquée à l'utilisateur.

Le diagramme 7 montre comment un champ magnétique  $H_{fluide}$  est obtenu à partir de la tension de consigne  $U_c$ . Le circuit magnétique est dimensionné pour fonctionner dans la partie pratiquement linéaire des courbes d'aimantation :  $B = \mu H_{fer}$ . La conservation du flux de  $B$  permet de calculer  $H_{fluide}$ . La loi de comportement du fluide magnéto-rhéologique donne la force exercée par le fluide sur la plaque en fonction du champ magnétique  $H_{fluide}$  (Goncalves *et al.* (2006)). Le modèle magnéto-électro-mécanique ci-dessus permet de calculer la force ressentie par l'uti-

$$\frac{U_c}{R + jL\omega} \quad I \quad \int H dl = NI \quad H_{fer}$$

FIG. 7 – Fonctionnement électromagnétique du système haptique

lisateur pour une consigne et un mouvement données. Nous avons mesuré la force d'interaction entre la touche et l'utilisateur lorsqu'un mouvement arbitraire est appliqué par celui-ci sous une tension de consigne constante. La figure 8 montre la comparaison entre la simulation et la mesure. Les deux courbes ont des allures semblables même si on constate une différence non

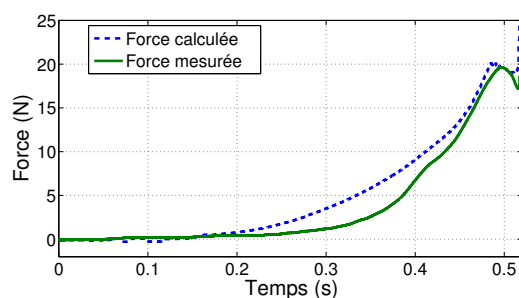


FIG. 8 – Comparaison simulation-mesure de la force ressentie par l'utilisateur pour une tension de consigne constante.

négligeable dans la partie intermédiaire. Ceci est dû à l'intégration de l'accélération mesurée ce qui provoque une imprécision numérique dans le calcul de l'angle de la touche.

## 5 Conclusions

Le schéma de contrôle de l'interface haptique que nous souhaitons mettre en œuvre n'utilise que la seule mesure du mouvement de la touche. Il faut donc disposer des modèles mécaniques de l'interface à émuler (touche traditionnelle) et de l'interface utilisée (système haptique). La nouvelle interface haptique est bien décrite par la modélisation. Dans le cas du modèle de la touche traditionnelle, la comparaison entre mesure et simulation du modèle montre le besoin de raffiner ce dernier : prise en compte des feutres de butée, du levier de répétition et de l'étouffoir. Ce travail est d'ores et déjà bien avancé. L'étape suivante consistera à implémenter de ces comportements dans une boucle en temps réel et à réaliser des tests de comparaison entre l'interface contrôlée et la mécanique traditionnelle.

## Références

- Dijksterhuis, P. 1965 De piano *Nederlandse Akoest. Genootschap* **7** 50-65
- Oledski, A. 1972 Dynamics of piano mechanisms *Mechanism and Machine Theory* **7** 373-85
- Hayashi, E., Yamane, M., Mori, H. 1999 Behavior of piano-action in a grand piano, I. Analysis of the motion of the hammer prior to string contact *Journal of the Acoustical Society of America* **105** 3534-44
- Cadoz, C., Lisowski, L., Florens, J. 1990 A modular feedback keyboard design *Computer Music Journal* **14(2)** 47-51
- Gillespie, B. 1996 Haptic Display of Systems with Changing Kinematic Constraints : The Virtual Piano Action *PhD thesis* Stanford University.
- Meisel, D. 2003 Key actuation systems for keyboard instruments *US patent No. US2003 :0213355A9*
- Jolly, M.R., Bender, J.W., Carlson, J.D. 1998 Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids *SPIE 5th Annual Symposium on Smart Structures and Materials* San Diego, CA.
- Ahmadian, M. 2002 On the application of magneto-rheological fluid technology for improving rail vehicle dynamics *Proceedings of International Mechanical Engineers Conference* New Orleans, Louisiana.
- Goncalves, F.D., Koo J., Ahmadian M. 2006 A Review of the State of the Art in Magnetorheological Fluid Technologies - Part I : MR fluid an MR fluid models *The Shock and Vibration Digest* **38(3)** 203-219