



**HAL**  
open science

## Simuler le son d'un piano

Juliette Chabassier

► **To cite this version:**

Juliette Chabassier. Simuler le son d'un piano. Mathématiques de la Planète Terre, , 2013. hal-00913678

**HAL Id: hal-00913678**

**<https://inria.hal.science/hal-00913678>**

Submitted on 4 Dec 2013

**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.

# SIMULER LE SON D'UN PIANO

Juliette Chabassier

*Travaux réalisés pendant la thèse de doctorat de Juliette Chabassier, co encadrée par Patrick Joly, directeur de recherche et responsable de l'équipe POEMS Inria Saclay et Antoine Chaigne, professeur et directeur de l'Unité de Mécanique à l'ENSTA Palaiseau, en collaboration avec Marc Duruflé, maître de conférences à l'université Bordeaux I.*

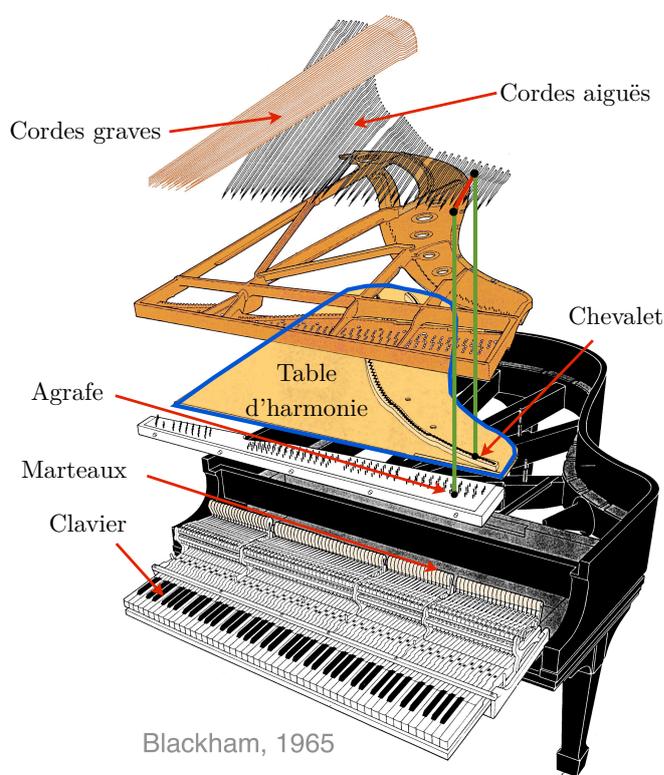


FIGURE 1 – Vue éclatée d'un piano à queue.

transmet l'énergie des cordes à la table d'harmonie, qui vibre elle aussi, supportée par le meuble du piano. Ceci met en mouvement les molécules d'air avoisinantes, et entraîne la propagation d'un son dans l'air, jusqu'à nos oreilles. De ce fonctionnement complexe, nous avons extrait un squelette simplifié, permettant de décrire seulement la "physique qui s'entend" et de mieux comprendre les mécanismes à l'origine de la génération d'un son de piano.

Chacune des étapes acoustiques et mécaniques considérées ainsi que leurs couplages peuvent être modélisés par des équations mathématiques issues des lois fondamentales de la physique. Un modèle général de piano est établi (voir [2]). La solution de ce modèle ne peut pas être calculée simplement mais nécessite la mise en œuvre de techniques de pointe d'analyse numérique. On peut alors évaluer la solution sur un ensemble fini de points (un maillage) de chaque partie de l'instrument comme illustré sur la figure 2. En raison du degré de réalisme des phénomènes étudiés, et de la préci-

La conception et la fabrication du piano sont très largement basées sur un savoir empirique issu de plusieurs siècles d'expérimentations, d'échecs, de succès... Les facteurs de piano ont acquis un ensemble de connaissances extrêmement précises (voir [3] et [4]) mais cherchent désormais à rationaliser leur approche en utilisant des méthodes scientifiques, afin de donner raison ou tort à certaines affirmations, et à aller plus loin dans la compréhension des phénomènes mis en jeu.

Le piano est un système acoustique et mécanique assez sophistiqué. On peut résumer très schématiquement son fonctionnement de la façon suivante (voir la figure 1) : le doigt du pianiste frappe une touche du clavier, un mécanisme très précis démultiplie le mouvement de la touche et met en mouvement un marteau. Le marteau frappe entre une et trois cordes à la fois (selon la note choisie), qui se mettent en vibration. Le chevalet

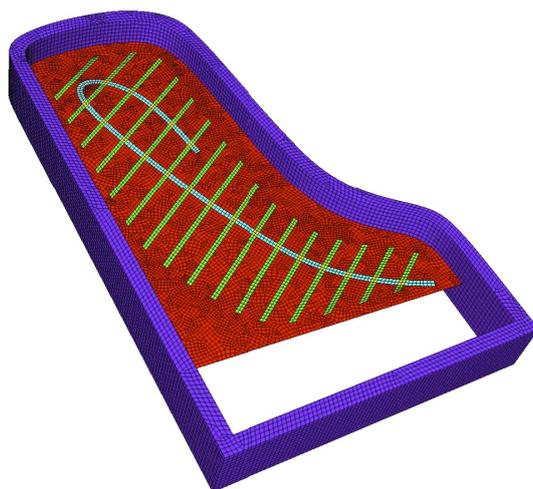


FIGURE 2 – Projection du maillage utilisé dans le volume d’air avoisinant le piano sur les obstacles à la propagation du son : le meuble et la table d’harmonie.

sion des méthodes de calcul utilisées, le logiciel doit fonctionner pendant 24 heures sur 300 processeurs en même temps pour calculer les vibrations dans tout le piano et l’air pendant une seconde.

En simulant un piano virtuel selon ces équations, on parvient à reproduire fidèlement des sons de piano (voir la figure 3), à suivre les vibrations à l’intérieur de l’instrument (voir la figure 4), mais aussi à connaître le champ de pression de l’air tout autour du piano, ce qui serait impossible à mesurer sans perturber le système. L’une des applications les plus enthousiasmantes de ces simulations est bien sûr l’aide à la facture instrumentale. En effet, ce modèle de piano peut permettre d’isoler certains phénomènes afin de comprendre leur influence sur le son, sur le rayonnement, ou encore sur la transmission de l’énergie... mais aussi de construire virtuellement des pianos qui n’existent pas encore (en changeant la forme ou la taille de la table d’harmonie, les matériaux utilisés...) et de pouvoir écouter le son qu’ils auraient s’ils étaient construits.

Encore plus intrigant, le modèle permet de générer des sons d’objets qui ne peuvent pas exister pour des raisons pratiques (matériaux inexistant, cordes de 7 mètres de long...) mais qui pourtant respectent les lois de la physique et dont le son paraît donc plausible à l’oreille, en ce sens que le cerveau parvient à les attribuer à une cause physique. On touche là une application très intéressante du point de vue de l’interaction entre science et musique : le fruit de la recherche permet d’offrir au compositeur des instruments nouveaux, un matériau sonore jusqu’ici inexistant et adaptable à souhait, lui permettant d’aller toujours plus loin à notre époque qui place le timbre et la manipulation du son au milieu de la création musicale (voir [1]).

Plus d’informations et de résultats numériques, physiques et musicaux sur le site :

[modelisation.piano.free.fr](http://modelisation.piano.free.fr)

## Références

- [1] A. Hufschmitt, “La synthèse par modèles physiques”, Mémoire de maîtrise, Université Paris Sorbonne (Paris IV), disponible à l’adresse [alinehuf3.free.fr](http://alinehuf3.free.fr)
- [2] J. Chabassier, “Modélisation et simulation numérique d’un piano par modèles physiques”, Manuscrit de doctorat de l’École Polytechnique, 2012.
- [3] C. J. Forss, “La réparation du piano”, l’Entretiens Editions, 2010.

[4] A. Reblitz, “Le piano, entretien, accord et restauration”, l’Entretemps Editions, 2005.

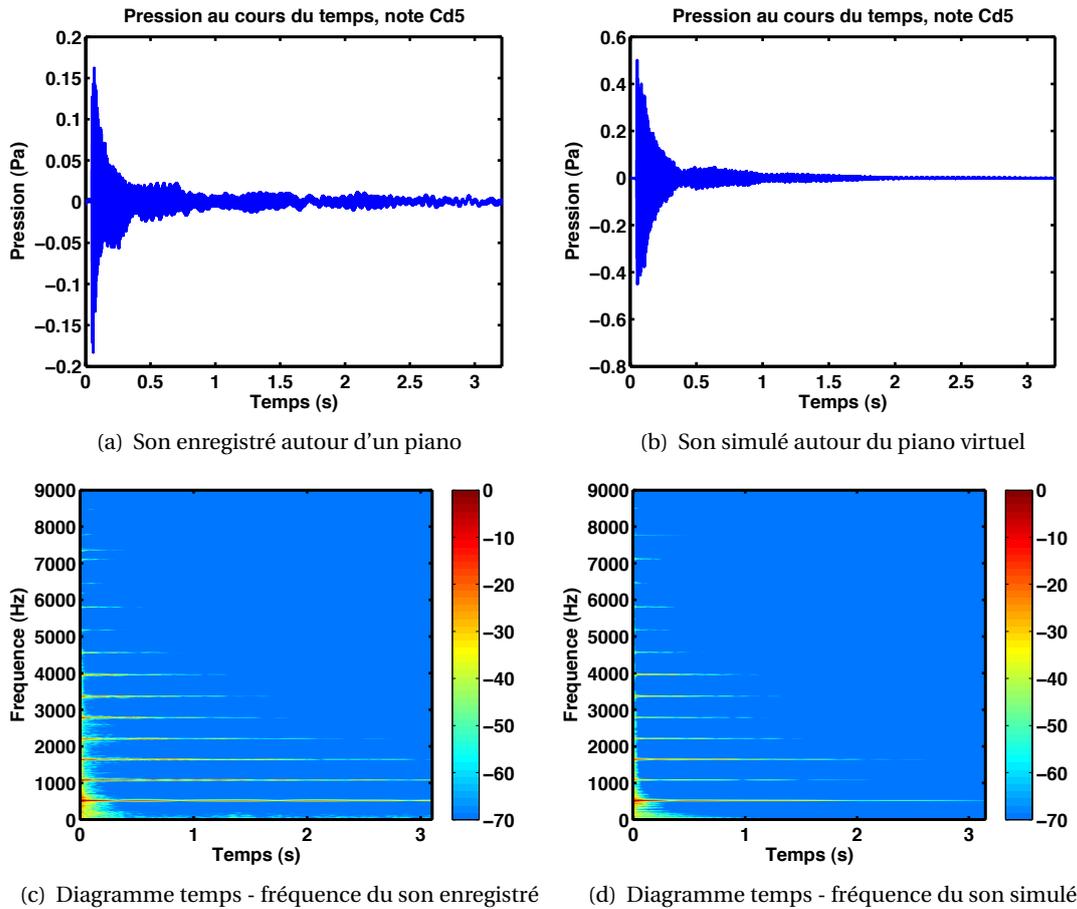


FIGURE 3 – Comparaison entre des mesures (gauche) et des calculs numériques (droite). Les allures de la pression en fonction du temps sont très fidèles, on observe clairement le phénomène de double décroissance du son de piano : le son décroît d’abord très vite puis beaucoup moins vite en effectuant des battements. Les diagrammes temps fréquences montrent le contenu fréquentiel en échelle logarithmique (0 dB contenant le plus d’énergie) du son en fonction du temps, mettant en évidence les harmoniques de la note C#5 (cinquième do dièse du clavier). On voit que la décroissance des harmoniques est bien reproduite (garante d’un réalisme du son), ainsi que la décroissance des modes de la table d’harmonie, dessinant le halo en basses fréquences au début du signal. Les sons peuvent être comparés sur la page [modelisation.piano.free.fr](http://modelisation.piano.free.fr).

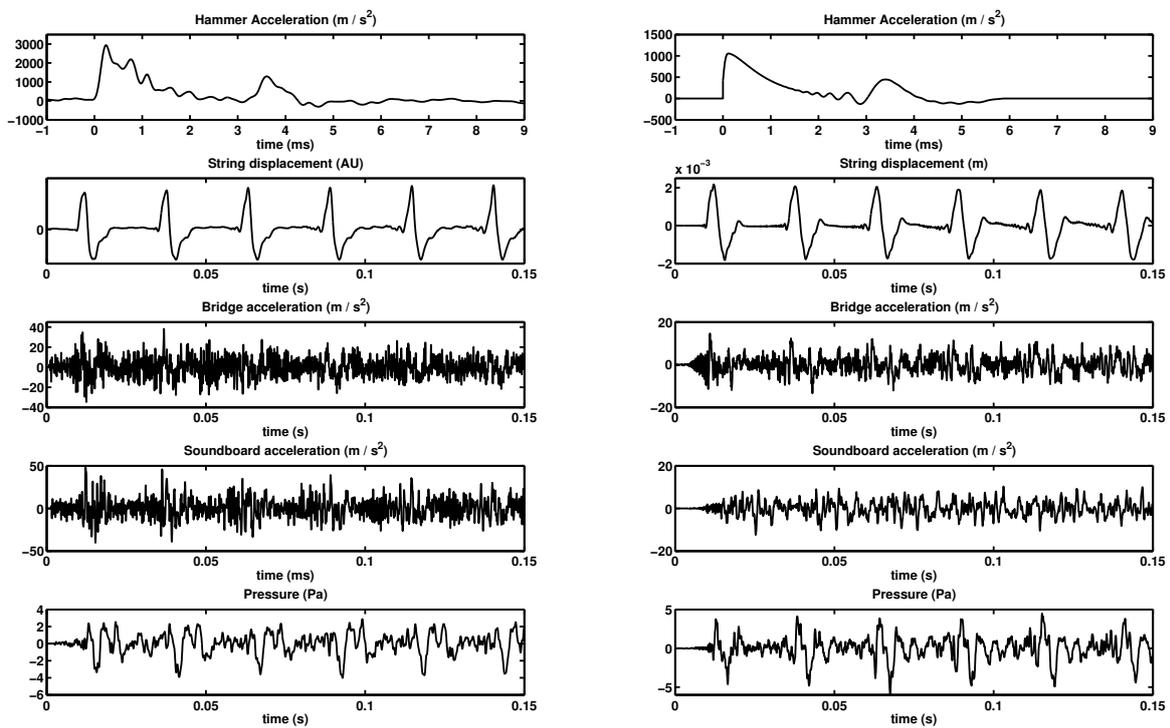


FIGURE 4 – Comparaison entre des mesures (gauche) et des calculs numériques (droite). De haut en bas : accélération du marteau, déplacement de la corde (en point donné), accélération du chevalet au bout de la corde, accélération de la table d'harmonie (en un point donné), pression sonore (encore en un point donné).

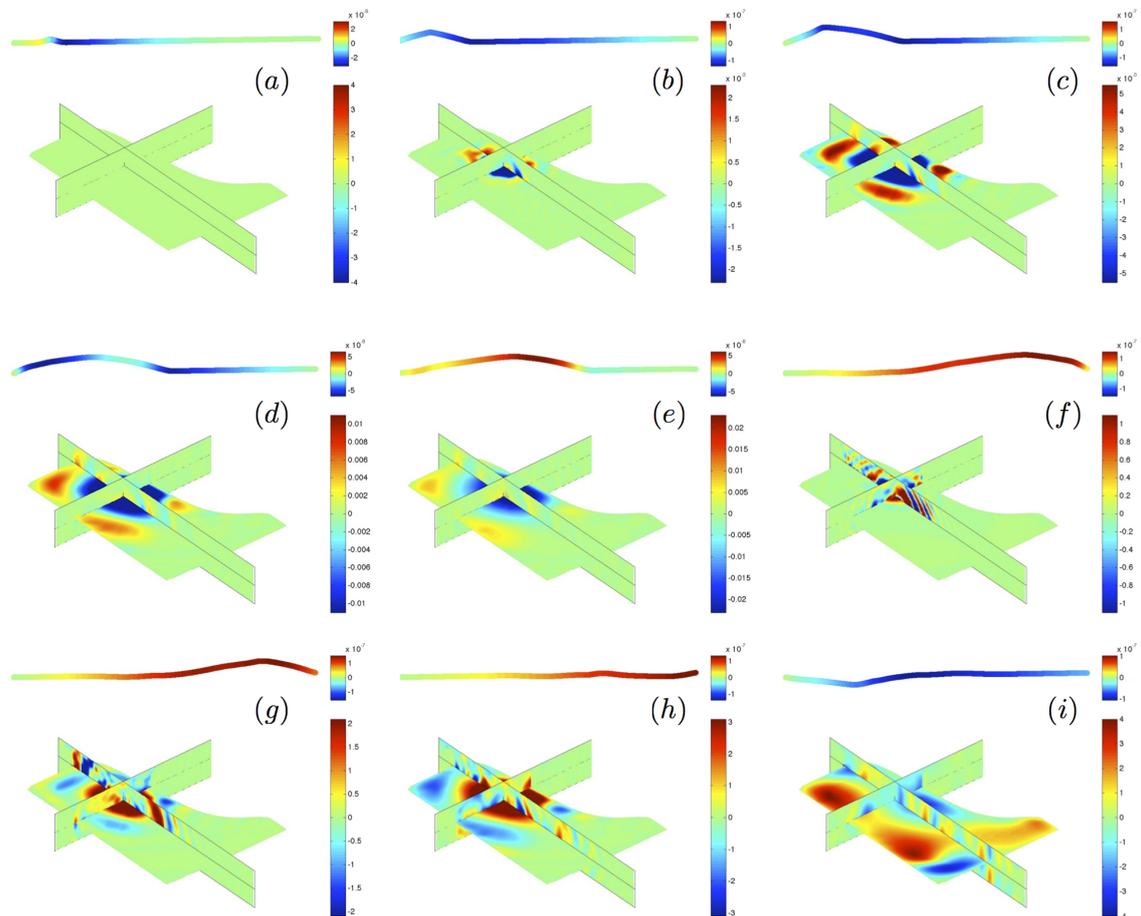


FIGURE 5 – Évolution de quelques variables (pression et déplacements) dans le modèle de piano pour la corde C2 (le deuxième do en partant du bas). Le déplacement transverse d'une des cordes est représenté en haut de chaque figure, où la couleur représente le déplacement longitudinal (l'échelle des couleurs correspondante est celle du haut pour chaque figure). Le déplacement de la table d'harmonie est représenté en bas de chaque figure, et la pression  $y$  est représentée dans deux plans verticaux qui se croisent au point où les cordes sont fixées. L'échelle des couleurs du bas se rapporte à cette pression. La couleur sur la table d'harmonie n'est ici pas normalisée. Les instants sont chronométrés à partir du lancé du marteau à une vitesse de 4,5 m/s : (a)  $t = 0.4$  ms. (b)  $t = 1.1$  ms. (c)  $t = 2.1$  ms. (d)  $t = 3.1$  ms. (e)  $t = 4.1$  ms. (f)  $t = 5.1$  ms. (g)  $t = 7.1$  ms. (h)  $t = 8.1$  ms. (i)  $t = 16.1$  ms. Le film dont sont issues ces images peut être consulté à la page [modelisation.piano.free.fr](http://modelisation.piano.free.fr)