



**HAL**  
open science

# LE PIANO : MODÉLISATION PHYSIQUES ET DÉVELOPPEMENTS TECHNOLOGIQUES

Xavier Boutillon

► **To cite this version:**

Xavier Boutillon. LE PIANO : MODÉLISATION PHYSIQUES ET DÉVELOPPEMENTS TECHNOLOGIQUES. Journal de Physique Colloques, 1990, 51 (C2), pp.C2-811-C2-820. 10.1051/jphyscol:19902189 . jpa-00230504

**HAL Id: jpa-00230504**

**<https://hal.science/jpa-00230504>**

Submitted on 4 Feb 2008

**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.

## LE PIANO : MODÉLISATION PHYSIQUES ET DÉVELOPPEMENTS TECHNOLOGIQUES

X. BOUTILLON

Laboratoire d'Acoustique et de Mécanique, CNRS UA 868, Université  
Pierre et Marie Curie, Tour 66, 4, Place Jussieu, F-75232 Paris Cedex  
05, France

**Résumé** - Les principaux éléments du piano (mécanisme, marteau, cordes, étouffoir, chevalet et table d'harmonie) sont analysés dans leur fonctionnement mécanique et acoustique. Plusieurs procédés de synthèse (à vocation commerciale ou de création musicale) sont décrits ainsi que des voies possibles d'évolution de la facture de cet instrument.

**Abstract** - The main components of the piano (key mechanism, hammer, strings, damper, bridge and soundboard) are analysed in a mechanical and acoustical perspective. Some numerical-synthesis processes (designed for general public use or musical creation) are described and link is made between musical-acoustics research and future possible changes in the instrument-making.

### INTRODUCTION.

Entre son apparition dans les salons au début du 18<sup>ème</sup> siècle jusqu'à son adaptation aux immenses salles de concert d'aujourd'hui en passant par les formes extravagantes prises au siècle dernier, le piano a gardé une identité esthétique qui fait conserver ce terme pour nommer des sons de synthèse issus de machines ne comportant plus ni marteaux, ni cordes, ni table d'harmonie. Le but sera ici de préciser les liens entre la production sonore de l'instrument et ce qu'on connaît actuellement de son fonctionnement puis de montrer, par les exemples les plus représentatifs comment la synthèse numérique peut recréer des sons de piano, enfin d'évoquer de possibles innovations en facture instrumentale.

### A - ÉTUDE PHYSIQUE DU PIANO.

#### *1) La chaîne mécanique de transmission et le son obtenu :*

Parmi tous les constituants d'un piano, nous nous contenterons d'examiner ceux qui ont une fonction acoustique dans la transformation de la consigne gestuelle donnée par l'instrumentiste en son rayonné vers l'auditeur. Il convient de distinguer deux chemins vibratoires qui donnent naissance à deux sons aux caractéristiques différentes.

Le premier chemin, qui n'a pas fait l'objet d'études particulières, mène à un son de percussion résultant du choc du doigt sur l'ensemble de la structure de l'instrument [1]. Ce bruit d'impact est assez sourd et précède très légèrement dans le temps le son principal [2]. Suivant le toucher adopté, il est plus ou moins présent à côté du son provenant de la vibration mais fait partie intégrante du timbre de l'instrument.

Le mouvement imprimé à la touche par le pianiste est transmis au marteau qui échappe et vient frapper la ou les cordes. Mises ainsi en vibration, les cordes repoussent le marteau, et mettent en mouvement la table d'harmonie et éventuellement d'autres cordes (celle associée à la même note si elle avait été mise hors d'atteinte du marteau par l'action de la pédale *piano* ou bien l'ensemble des autres cordes si les étouffoirs ont été libérés par l'action de la pédale *forte*) par l'intermédiaire du chevalet. C'est le son émis par la table d'harmonie que nous entendons finalement. L'arrêt du son est le plus souvent provoqué par l'abaissement de l'étouffoir qui amortit rapidement les vibrations des cordes.

Le timbre de l'instrument se caractérise par la superposition de plusieurs composantes régies par des mécanismes physiques différents : outre le bruit d'impact et le son généré par les vibrations de flexion transversale des cordes associées à la note jouée (c'est le son principal), on entend, faiblement, celui généré par les ondes de compression dans ces mêmes cordes et le son dû à la vibration des autres cordes, en particulier celles du registre aigu, dépourvues d'étouffoirs.

Le son principal se distingue de celui d'autres instruments par l'absence de partie stable, un transitoire d'attaque extrêmement bref (la note s'établit en 15 ms environ), suivi d'une décroissance assez rapide puis, au bout de 0,5 à 2 s, d'une extinction plus lente ; dans le transitoire de fin apparaît aussi un bruit dû à la retombée d'une partie de la mécanique. Les partiels de chaque note ont des fréquences presque harmoniques, présentent très souvent des battements et suivent des évolutions temporelles indépendantes, ce qui crée cette impression de modulation du timbre, si caractéristique. Le rapport initial d'amplitude entre les partiels dépend de l'excitation par le marteau ce qui fait varier la sonorité en fonction de la nuance de jeu adoptée.

## 2) Modélisations de la corde :

La corde joue un rôle central dans le fonctionnement de l'instrument. Elle n'émet aucun son audible [3] mais stocke l'énergie cédée par le marteau et, par ses résonances très marquées, dicte son comportement vibratoire à la table d'harmonie. Ceci explique d'une part le soin apporté en facture à la conception du plan de cordes (choix des longueurs, tensions, diamètres, matériaux et filages), l'importance de l'accord dans le réglage de l'instrument et d'autre part, la recherche d'une grande finesse de modélisation par les physiciens.

La théorie la plus simple d'une corde parfaitement flexible, infiniment fine, rigidement fixée à ses extrémités, prédit des partiels de vibration harmoniques, sans aucune transmission ni perte d'énergie. La remise en cause de chacune de ces hypothèses simplificatrices va faire générer de nouveaux modèles capables d'expliquer les écarts observables aux conclusions précédentes.

Les mécanismes de perte et de transmission de l'énergie constituent l'écart le plus flagrant à cette théorie élémentaire : c'est par eux que le son s'éteint et que nous l'entendons. Il convient de distinguer les phénomènes liés aux mouvements des extrémités de la corde, qui seront développés plus loin, de ceux responsables de la dissipation de l'énergie dans la corde isolée. D'après les évaluations de C. Valette, les importances des deux classes de phénomènes sont comparables, en ordre de grandeur, dans tous les domaines de fréquence. Les pertes dans la corde elle-même ou dans son voisinage aérien immédiat ont été étudiées sous les angles expérimental et théorique pour la corde de clavecin [4] ; les résultats peuvent être extrapolés aux cordes de piano. L'amortissement par frottement visqueux dans l'air augmente lorsque la fréquence diminue et prédomine en-dessous de 1 kHz environ (pour une corde de piano). Les pertes par viscoélasticité dans le métal augmentent avec la fréquence et dominant au-dessus de 1 kHz. Les pertes par vibration des dislocations et par conduction de la chaleur sont faibles et interviennent autour de 1 kHz.

Comme deuxième écart aux conclusions de la théorie élémentaire, on peut observer que les fréquences propres d'une corde de piano ne sont pas rigoureusement multiples d'un fondamental mais que chaque partiel a une fréquence légèrement supérieure [5]. Les hypothèses à abandonner sont celles de la corde infiniment fine et flexible. Pour une corde de diamètre  $d$ , de longueur  $L$ , sous une tension statique  $T$  et faite dans un matériau de module d'Young  $E$  et de densité  $\rho$ , la formule théorique  $f_n = n f \sqrt{1 + B n^2}$  avec  $B = \pi^3 E d^4 / (64 T L^2)$  rend remarquablement bien compte des valeurs d'inharmonicité observées expérimentalement. Dans le modèle résultant, la corde de piano tient à la fois de la corde idéale évoquée plus haut et de la barre métallique ; on comprend donc bien pourquoi le coefficient d'inharmonicité est d'autant plus faible que la corde est longue, fine et tendue. La manifestation la plus évidente de cette inharmonicité des partiels apparaît dans la difficulté à identifier les notes graves, comprenant de nombreux partiels, d'un piano droit. C'est une des raisons de la supériorité des pianos de grande taille. Cette inharmonicité des partiels a aussi des conséquences dans la façon d'accorder l'instrument, et qui seront analysées plus loin.

Une manifestation spectaculaire de l'inharmonicité des partiels jointe à la particularité spectrale des premières formes d'onde (série lentement décroissante des partiels, tous plus ou moins en phase à l'instant initial) est l'apparition d'un précurseur dans la forme temporelle du signal [6]. Cependant, même dans le grave du piano, ce précurseur ne s'entend pas en tant que tel [7]. La raison en est que la cohérence en phase des partiels dans le déplacement de la corde est altérée par les mécanismes du rayonnement par la table d'harmonie et de diffraction acoustique par le proche environnement. L'oreille, qui est sensible aux éléments localisés du signal temporel dans le domaine des fréquences très graves, perçoit un effet dans le signal prélevé sur la corde mais pas dans le signal acoustique où le précurseur n'existe plus.

La nécessaire prise en compte du diamètre fini de la corde et du module d'Young de son matériau constitutif, a d'autres conséquences, moins spectaculaires toutefois que l'inharmonicité des partiels.

La longueur de la corde en vibration est supérieure à celle au repos, il en est donc de même de la tension et donc de la fréquence. Il est possible de déceler au fréquencemètre une légère décroissance de la fréquence de chaque partiel au début du son, où l'amplitude est la plus grande. Bien qu'observable, le phénomène est cependant soit trop faible soit masqué par d'autres pour être clairement perçu sur le piano alors qu'il l'est sur la harpe ou la guitare (c'est le "pialement" [8]).

Un autre phénomène lié seulement à l'élasticité longitudinale de la corde est celui connu sous le nom de vibration d'octave. Au cours d'un cycle de vibration à la fréquence  $f$ , la corde s'allonge et se raccourcit deux fois, de façon quasi-statique. Il s'exerce alors à l'extrémité une force dans la direction de la corde à une fréquence double de celle de la vibration transversale. Il serait donc plus approprié de parler d'effort d'octave [8]. Le renforcement des partiels pairs qui en résulte dépend essentiellement de la mobilité du chevalet perpendiculairement au plan de la table sous l'action d'une force orientée comme la corde. Cet effet est particulièrement notable sur la harpe [9] mais n'a jamais été étudié spécifiquement sur le piano.

Le versant dynamique de la propriété d'élasticité longitudinale est l'existence d'ondes de compression, en une série harmonique de fréquence fondamentale  $(1/2L)\sqrt{E/\rho}$ , beaucoup plus élevée que celle des vibrations de flexion à  $(1/2L)\sqrt{T/\mu}$  (avec  $\mu=\rho L$ ). Ces ondes de compression génèrent sur le piano des sons parfaitement discernables du son principal. L'effet est surtout notable sur le transitoire d'attaque des cordes graves [6]. En soignant particulièrement le calibrage des cordes, on peut accorder les deux séries, ce qui parfait la définition de la hauteur sonore et améliore l'égalité entre les notes [10].

Le caractère non-linéaire de la vibration des cordes métalliques aux fortes amplitudes a pour autre conséquence la génération des modes supérieurs par les modes les plus bas. Ce couplage des modes de flexion entre eux est clairement prédit par les équations [11]. Le détail des transferts énergétiques n'est pas encore complètement élucidé. Les expériences sur le clavecin [12] montrent que ce phénomène est notable, sur le plan quantitatif, dans les conditions normales de jeu. Ce phénomène étant lié aux fortes déformations du mouvement de la corde, il enrichit le précurseur et se traduit lors de l'attaque par une accentuation perceptible mais fugace des partiels aigus.

Un dernier point, encore au stade de spéculations, concerne l'instabilité du mouvement plan de la corde. Il a été démontré théoriquement [13] que le plan de polarisation du mouvement d'une corde tourne lentement : cet effet est probablement négligeable dans le cas du piano où les cordes sont très tendues. L'évolution du plan de polarisation serait plutôt dû à l'excitation par les cordes voisines, à des fréquences très légèrement différentes de la fréquence de résonance.

### 3) Cordes couplées au chevalet :

L'évolution temporelle du son après l'attaque (double décroissance et battements) vient de l'existence d'au moins deux modes propres du système vibrant pour chaque partiel. Dans un article repris par la suite dans des publications destinées au grand public [14], G. Weinreich a décrit l'ensemble des phénomènes relatifs à la vibration de cordes couplées par l'intermédiaire du chevalet. Le raisonnement étant facile à étendre, il suffit de restreindre la discussion au cas de deux modes propres qui trouvent leur origine dans l'existence de deux cordes associées, ou bien des deux plans de polarisation pour la vibration d'une corde seule. Ces deux systèmes, pris isolément, n'ont généralement pas exactement la même fréquence de vibration (les cordes associées ne sont pas rigoureusement à l'unisson ; les admittances mécaniques dans chaque plan de vibration, et donc les corrections de longueur, sont différentes) et sont couplés par la mobilité du chevalet. Le système global résultant possède alors deux modes propres dont les fréquences propres se différencient selon la nature du couplage (résistif, réactif, ou les deux) et la différence des fréquences hors couplage  $\Delta f$ . Dans le cas du couplage strictement réactif, les fréquences propres sont purement réelles (donc le système n'a pas d'amortissement) et diffèrent d'un peu moins que  $\Delta f$ , occasionnant ainsi des battements. Dans le cas du couplage strictement résistif et si  $\Delta f$  n'est pas trop grand, les fréquences propres ont la même partie réelle (pas de battements) et ne diffèrent que par la partie imaginaires (deux taux de décroissance). Les autres cas réunissent double décroissance et battements.

En pratique, le son immédiat résulte du mode ayant la décroissance la plus forte et qui correspond à une sollicitation de la table soit perpendiculairement à son plan (cas d'une seule corde), soit par les deux cordes vibrant pratiquement en phase, juste après l'attaque : les vibrations sont donc importantes et puisent vite l'énergie des cordes. Le son immédiat est donc intense mais s'éteint rapidement. Le son rémanent vient de la sollicitation de la table par une seule corde dans l'autre plan de polarisation, ou par

deux cordes vibrant en grand décalage de phase (peu après l'attaque, du fait de  $\Delta f$ ) ; à l'inverse du son immédiat, la table vibre alors peu mais plus longtemps.

Dans un piano à queue, la pédale *una corda* déplace le marteau transversalement. Cela aura tendance à diminuer l'importance relative de la polarisation verticale d'une corde isolée ou bien celle du mode "en phase" pour un doublet ou un triplet par la forte dissymétrie introduite au départ dans les vibrations de chaque corde. L'action de cette pédale est donc toujours d'atténuer le son immédiat pour adoucir la sonorité.

#### 4) L'accord du piano :

A cause de l'inharmonicité éventuellement prononcée et des battements inhérents au mode de fonctionnement des cordes qui vient d'être exposé, l'accord du piano se fonde sur des principes très différents de ceux qui président à l'accord du clavecin ou de l'orgue. De très nombreux ouvrages ou publications traitent de ces questions [5]. Schématiquement (et sans respecter l'ordre chronologique suivi par l'homme de l'art), il faut établir une partition de l'octave (l'octave médiane est généralement choisie), ajuster les autres notes de l'instrument et régler l'évolution temporelle de chaque note. L'accord d'une corde d'un triplet sert aux deux premières opérations, celui des cordes associées sert à la dernière. Pour celle-ci, on a vu comment le désaccord entre cordes permet d'ajuster la double décroissance et d'éventuels battements. La présence de trois cordes en général donne un degré de liberté supplémentaire, utile en particulier pour homogénéiser cet aspect de la sonorité, d'une note à ses voisines. La partition est effectuée selon le tempérament égal, d'une part en raison du répertoire musical et d'autre part parce que les battements intrinsèques à l'instrument vident largement de son sens pratique l'adoption d'un tempérament inégal particulier qui viserait, par exemple, à garder certaines quintes pures (c'est à dire exemptes de battements ...). L'extension de la partition aux octaves hautes et basses est très particulière à l'instrument. En raison de l'inharmonicité des partiels, l'octave d'un  $Ut_2$  (ou pour un  $Ut_1$ , la double octave, fréquemment utilisée par les accordeurs) ne battra avec le fondamental d'un  $Ut_3$  que si l' $Ut_2$  est accordé légèrement plus bas que la moitié de la fréquence de l' $Ut_3$ . Cet élargissement des octaves dans le grave trouve sa source dans une particularité physique du piano (l'accord de l'orgue, par exemple, fait intervenir des octaves rigoureusement justes). Le même phénomène, auquel se joint une préférence de nature psycho-acoustique, fait accorder les notes aiguës plus haut que l'accord "théorique".

#### 5) Le marteau :

##### a - La mécanique

Le rôle de la mécanique de marteau consiste à donner une vitesse au marteau, le libérer juste avant qu'il ne parvienne au contact des cordes, le récupérer à l'issue de son interaction avec celles-ci en vue d'une éventuelle répétition. Le premier dispositif historique de Cristofori, remarquable d'ingéniosité, fut suivi par d'autres, en réalité moins performants, jusqu'à l'avènement de la mécanique d'Erard dite "à double échappement". Il convient de noter qu'entre l'échappement et la frappe des cordes, le marteau perd une partie de sa vitesse et n'est plus lié en aucune façon à l'instrumentiste. Outre l'avantage de cordes généralement plus longues que celles d'un piano droit, le piano à queue possède celui d'une mécanique plus sensible pour le contrôle des nuances de jeu et plus performante dans la répétition. A la limite du jeu *piano*, le choc sur la corde ne suffit pas à renvoyer le marteau sur l'attrape-marteau ; le retour se fait sous l'action de la pesanteur dans le piano à queue, d'un ressort de rappel dans le piano droit. A cause d'un réglage relativement délicat, ce dernier dispositif impose de prendre une certaine marge de sécurité pour assurer un preste retour du marteau. La vitesse d'échappement correspondant à une vitesse d'arrivée nulle sur les cordes est alors plus grande que sur un piano à queue ce qui se traduit par une latitude de contrôle moindre laissée à l'instrumentiste dans ce domaine de nuance [2]. Pour des raisons similaires, la répétition sur le piano à queue se fait en relâchant moins la touche que sur le piano droit d'où une vitesse potentielle de jeu plus élevée.

Les rares publications sur le sujet [15] traitent le système touche-mécanisme-marteau comme deux masses reliées par un ressort, jusqu'à l'échappement. Dans l'hypothèse d'une force constante exercée sur la touche, il existe donc une valeur de cette force pour laquelle la vitesse d'échappement passe par un maximum. Une mécanique bien conçue et bien réglée serait telle que cette valeur limite fût légèrement supérieure à la force maximale qu'un pianiste peut exercer. Les frottements, d'ailleurs difficiles à mesurer, ne sont pas inclus dans ce modèle, non plus que la pesanteur.

### b - Interaction avec la corde

La mécanique ne se contente pas de donner une vitesse au marteau. Suivant le toucher, le manche du marteau, très légèrement flexible [16], sera ou non animé d'une vibration de flexion au moment de l'échappement. Les mesures [2, 17] montrent que le mouvement additionnel ne modifie pas de manière significative l'interaction qui va suivre avec les cordes. Nous reviendrons sur cette question du toucher avec l'examen de l'étouffoir.

Si deux notes obtenues avec deux lancers différents mais ayant donné la même vitesse au marteau, sont peu voire non discernables, il n'en est pas de même pour deux notes correspondant à deux vitesses différentes [17]. L'enrichissement progressif en partiels aigus au fur et à mesure de la montée en nuance dénote une non-linéarité forte dans l'action du marteau sur la corde. Hors le bruit de percussion et le transitoire d'extinction, le reste de la sonorité d'une note est donc complètement corrélé à son amplitude globale et varie fortement avec celle-ci. L'oreille est probablement plus sensible à la variation de sonorité qu'à la variation d'intensité globale lorsque la vitesse du marteau ne varie que peu d'une note à une autre.

De nombreuses études ont tenté de rendre compte de l'interaction entre le marteau et la corde. Assimiler le marteau à une masse permet de trouver une solution analytique du problème mais est hautement irréaliste. Le stade suivant consiste à interposer un ressort entre la corde et la masse pour rendre compte du feutre. Même dans le cas linéaire, la description purement analytique de l'interaction complète entre une corde et ce modèle de marteau n'a pu être faite. Dans une série d'articles récents [18], D. Hall récapitule les travaux antérieurs et propose une solution mi-analytique, mi-numérique pour traiter les modèles masse seule ou masse-ressort (linéaire) sous différentes hypothèses. Fort intéressante dans son concept, cette approche ne cerne cependant pas d'assez près la réalité pour simuler la génération de la vibration dans un piano en une bonne concordance avec les déterminations expérimentales.

Les modélisations les plus réalistes sont celles qui incorporent la non-linéarité, responsable du changement de couleur sonore dans les différentes nuances de jeu. Les mesures suggèrent que la non-linéarité est concentrée dans le feutre ; il suffit donc de garder le système masse-ressort en modifiant ce dernier de telle sorte que la force  $F$  exercée sur la corde soit fonction non-linéaire de l'enfoncement  $\Delta l$  :  $F = \sum a_n \Delta l^n$  [19], ou  $F = a \Delta l^\alpha$  [17]. Lors du contact avec la corde, le feutre se comprime et se détend plusieurs fois avant la perte de contact ; comme la relaxation interne n'est probablement pas instantanée, il se trouve que la raideur augmente au fur et à mesure de ces cycles de contrainte. La prise en compte de cet hystérésis peut se faire en incrémentant le paramètre  $\alpha$  à chaque inversion du sens d'évolution de  $F$ . Ceci m'a permis finalement d'approcher de très près, par la simulation numérique, ce qui se passe effectivement au cours du contact.

En reprenant le formalisme non-linéaire à deux paramètres mais sans incorporer l'hystérésis, il est possible d'obtenir une bonne mesure du premier couple  $(a, \alpha)$  par une méthode simple [20]. Une caractérisation approchée mais convenable des marteaux est alors possible sur toute l'étendue du clavier et sur divers pianos. Par ailleurs, il apparaît possible de prédire les coefficients  $a$  et  $\alpha$  par un modèle du feutre en éléments finis [21].

#### 6) L'étouffoir :

Le paradoxe est grand entre le rôle fondamental de l'étouffoir et l'absence de connaissance scientifique à son sujet. Comme on l'a vu plus haut, le toucher n'a pas d'importance mesurable (ou plus exactement mesurée ...) dans la naissance de la note puisque le marteau, très raide, n'est plus en relation avec le doigt de l'instrumentiste au moment où il va frapper la corde. En revanche, l'extinction de la note se fait sous son contrôle direct grâce à la continuité mécanique du doigt à l'étouffoir et à la corde. C'est au passage d'une note à l'autre, qui est bien évidemment un lieu essentiel de la science de l'interprétation, que le pianiste peut agir sur la sonorité, indépendamment de la nuance de jeu. L'articulation consiste précisément à maîtriser la façon dont un mouvement (attaque d'une note par exemple) en influence un autre (terminaison de cette note) ; la perception de la couleur sonore d'une note brève incorpore à la fois attaque et extinction et est conditionnée par les notes immédiatement voisines.

#### 7) La table d'harmonie - rayonnement et directivité :

L'ensemble table d'harmonie-chevalet est beaucoup plus difficile à caractériser que la corde ou le marteau ou même l'étouffoir. D'une part, la structure elle-même est infiniment plus complexe : à deux

dimensions, inhomogène, anisotrope, sans symétrie de formes. D'autre part, on ne sait pas caractériser clairement le résultat sonore que l'on veut obtenir.

La table d'harmonie est soumise à deux types de contraintes : statique (par l'effet de la tension) et dynamique (par les vibrations des cordes). Si l'effort considérable dû à la tension des cordes parallèlement au plan de la table est presque entièrement repris par le cadre, l'effort perpendiculaire à ce même plan, dû à la légère orientation vers le bas (pour un piano à queue) de la partie "morte" de la corde, s'exerce sur la table elle-même.

Une importante étude expérimentale parue ces dernières années émane du Physikalisch-Technisches Bundesanstalt et a été menée par K. Wogram [22]. Pour une excitation à vitesse constante, successivement en 14 points du chevalet, sont mesurées la force au point d'excitation (donnant ainsi une mesure de type "impédance") et la pression en un point du champ acoustique. Ces deux paramètres permettent de comparer sous les angles mécanique et acoustique des états successifs de la table d'harmonie : cordes détendues progressivement puis enlevées, avec ou sans barrage, avec ou sans cadre, barres de table progressivement enlevées. Le rôle statique ou dynamique de chaque élément est ainsi clairement établi et une corrélation est établie entre modifications de structure et changements du spectre de vibration.

A l'heure actuelle, les recherches progressent dans la voie de l'analyse modale (technique d'investigation) et de l'analyse par éléments finis (technique de modélisation). Certaines grandes firmes menant leur propres recherches [23] ou les sous-traitant à des instituts spécialisés, utilisent ces techniques sans toujours publier leurs résultats. Les problèmes majeurs à résoudre sont de deux ordres : connaître les valeurs des paramètres à introduire dans le calcul (coefficients mécaniques du bois) et modéliser correctement les conditions aux limites, et ceci sans parler d'une éventuelle validation expérimentale, toujours longue à effectuer. Par l'examen expérimental de paramètres physiques bien définis, l'étude prudente mais fouillée de H. Suzuki [24] apporte les éclairages suivants : l'efficacité de rayonnement (définie comme le rapport entre la puissance sonore rayonnée à la surface de la table et la puissance mécanique fournie par les cordes) est très faible au-dessous de 80 Hz, dépend ensuite fortement de la fréquence jusqu'à 1,2 kHz environ, se stabilise à une valeur assez forte au dessus. La question reste encore posée du lien entre les résultats du calcul ou de la mesure (modes propres, caractéristiques du champ émis) et les paramètres perceptifs significatifs (timbre de l'instrument, homogénéité entre notes ou entre registres de nuances, portée sonore, etc...)

L'étude du rayonnement en champ lointain (c'est à dire vers l'auditeur) est évidemment très complexe, étant données la taille de l'instrument et l'influence de son environnement architectural. Le rôle de la position du couvercle a été abordée par plusieurs auteurs, sous divers angles expérimentaux. Les enregistrements faits par C. Ceon, dans une perspective de prise de son de concert, montrent qu'un auditeur perçoit, pour différentes positions du couvercle, des changements beaucoup moins sensibles qu'on ne l'imagine généralement, surtout lorsqu'on les compare à ceux apportés par un pupitre placé devant un trompettiste ou l'orientation d'un corniste par exemple. Des diagrammes de directivité sont donnés par J. Meyer [25] pour les différentes configurations du couvercle et mettent en évidence une direction d'émission privilégiée, correspondant bien à la position adoptée en concert. Une autre étude [26] évalue le temps d'établissement de l'intensité maximale d'une note ainsi que son amplitude globale. Il en ressort que les différences de niveau sonore sont relativement faibles (<3 dB) entre positions extrêmes du couvercle mais que sa fermeture favorise un établissement rapide du son, adapté donc plus particulièrement à la musique de chambre.

## B - LA SYNTHÈSE.

Grâce au développement des techniques numériques, les sons de piano sont maintenant synthétisés, aussi bien dans les laboratoires et instituts de recherche que sur le marché grand public. Les deux perspectives obéissent cependant à des logiques opposées. Dans le premier cas, il s'agit d'un outil de création où l'originalité des sons et la flexibilité d'emploi sont requises, même au prix de calculs lourds et d'une mise au point longue. Dans le second, ce sont les impératifs de prix de revient et d'adaptation à l'utilisation par le plus grand nombre qui priment. Les procédés sont donc généralement différents.

### *1) Exemples de procédés utilisés dans les synthétiseurs commerciaux :*

Le procédé intellectuellement le plus simple pour obtenir un son de piano consiste à le mettre en mémoire et le restituer tel quel. Ce procédé (appelé échantillonnage ou "sampling") permet de conserver

l'attaque, l'évolution du spectre, etc... Plusieurs enregistrements sont cependant nécessaires pour la même note si l'on souhaite rendre compte des changements de sonorité en fonction des changements de dynamique. Pour des raisons évidentes de coût, il faut limiter ce nombre (à deux ou trois) et interpoler en fonction du paramètre de dynamique donné par le clavier. De même, le nombre de notes effectivement enregistrées est largement inférieur au nombre total de touches du piano : on obtient les autres par transposition des notes de référence. Les problèmes résident dans la transposition du bruit à l'attaque et le compromis entre quantité de mémoire (c'est à dire coût) et réalisme sonore. Le savoir-faire de l'industriel consiste à utiliser les possibilités de son appareil de synthèse pour masquer les imperfections apportées par la restriction du nombre de notes enregistrées : filtrage, interpolation, découpages divers...

Un autre procédé commercial courant pour synthétiser des sons de piano consiste à utiliser un algorithme de synthèse par modulation de fréquence. Les paramètres de modulation des oscillateurs sont alors ajustés à l'oreille, note par note et figés en mémoire du synthétiseur. Ce procédé est extrêmement économique car il n'utilise qu'un petit nombre de paramètres et d'oscillateurs pour une grande variété de résultats sonores. Très éloigné du processus physique à l'origine du son, il ne permet pas d'obtenir la même qualité que le procédé d'échantillonnage.

Il est à noter que dans les deux cas, la mise au point finale du produit s'apparente alors beaucoup plus au travail du facteur de pianos classiques (harmonisation, recherche de l'homogénéité selon des critères essentiellement perceptifs) qu'à celui du scientifique essayant de comprendre et de reproduire un phénomène.

## 2) Différents procédés d'analyse et recomposition - applications :

L'esprit des procédés précédents consistait à copier le mieux possible le son émis par l'instrument. Il est possible d'approfondir la démarche et de rechercher la ressemblance à partir des constituants du son et non plus de sa manifestation extérieure. Le principe consiste à enregistrer le son, l'analyser, c'est à dire le décomposer en somme de fonctions élémentaires. Après sélection et/ou modification des paramètres de l'analyse, la synthèse est effectuée selon le principe inverse de celui de l'analyse. Ces procédés demandent beaucoup plus de calculs que les précédents et ne se font donc généralement pas en temps réel. En revanche, l'intervention possible entre l'analyse et la synthèse permet des altérations du son ; le travail possible sur un matériau de base déjà très riche rend ces procédés attrayants pour la création musicale.

La fonction analysante la plus habituelle est bien sûr la sinusoïde. Par transformation de Fourier des tranches successives d'un son de piano, on obtient une description temporelle de chaque partiel. Le son final est obtenu par synthèse additive. Grâce à un regroupement des partiels et une transposition de notes de référence, on réalise une économie de calculs suffisante pour faire faire la synthèse inverse par un appareil disponible actuellement sur le marché. En revanche, les problèmes de l'attaque ne sont pas résolus par des techniques aussi simples. On peut se retourner vers le procédé d'échantillonnage et ajouter l'attaque au son obtenu (c'est ce qui est fait dans le synthétiseur commercial) ou, pour garder la possibilité d'une manipulation intermédiaire, la considérer comme la réponse d'un filtre excité par une impulsion ou un bruit. C'est l'approche retenue par X. Serra [27] dans la mise au point d'un procédé très élégant d'analyse et de synthèse inverse.

Plus proche du modèle de production sonore d'un instrument à percussion comme le piano est le choix d'une sinusoïde amortie comme fonction d'analyse [28]. L'approche est intellectuellement très intéressante, l'imitation du son de départ excellente mais les calculs extrêmement lourds.

Un intermédiaire entre la décomposition en somme de fonctions analysantes et la synthèse par modèle physique (voir paragraphe suivant) consiste à présupposer que le signal est formé de la somme des réponses de différents résonateurs à une excitation impulsionnelle. L'analyse consiste à extraire les caractéristiques de ces résonateurs [29]. Au moment de la synthèse, on peut modifier ces caractéristiques ou, plus intéressant, choisir une nouvelle fonction d'excitation, pour obtenir des résultats sonores "hybrides" de plusieurs instruments, selon les promoteurs de cette technique.

## 3) Synthèse par modèles physiques :

Un autre moyen de synthèse, peut-être plus souple mais encore plus exigeant en moyens de calculs, consiste à partir des équations décrivant le modèle physique de l'instrument. Les solutions analytiques de ces équations sont programmées et l'ordinateur est aussi utilisé pour résoudre numériquement les équations non-linéaires du modèle. L'outil de synthèse ainsi obtenu est très utile au



chercheur pour tester l'importance perceptive des phénomènes physiques qu'il étudie. En dépit de l'accès très intuitif aux paramètres de la synthèse (pour le piano, ce sera la taille des cordes, la masse et la raideur du marteau, ...), l'utilisation musicale est encore très entravée par la grande quantité des calculs nécessaires. Les résultats sonores sont satisfaisants dans la mesure de la finesse des modèles utilisés [30], [31] ou des aménagements apportés ensuite (filtrages, lissages, ...).

## C - LES ÉVOLUTIONS EN FACTURE INSTRUMENTALE.

### *1) Perspectives d'améliorations ponctuelles en facture traditionnelle :*

Si le fonctionnement en est bien défini, le piano est un instrument qui a beaucoup évolué depuis son apparition et continue de le faire, dans une certaine mesure. Bien qu'il soit difficile de parler d'améliorations dans un domaine où l'esthétique exerce une forte prépondérance, il existe cependant des possibilités de modifications fructueuses. Les trois points suivants illustrent des articulations possibles entre facture et recherche sur le fonctionnement de l'instrument.

La complexité de la mécanique de marteau laisse un champ assez libre pour des propositions d'améliorations. En particulier, plusieurs projets existent qui visent à rapprocher le fonctionnement de la mécanique de piano droit de celle du piano à queue. Faisant parfois l'objet d'un dépôt de brevet, ces tentatives souvent très ingénieuses ne prennent pas toujours en compte l'ensemble des impératifs auxquels doit satisfaire la mécanique de marteau [15]. De plus, la nécessaire fabrication d'un prototype complet de clavier exige pratiquement l'investissement d'un industriel à un stade assez précoce de la recherche.

Reprenant une idée plus ancienne, H. Suzuki a montré récemment [32] comment on pouvait corriger l'inharmonicité d'un certain nombre de partiels (les dix premiers, par exemple) au moyen d'une petite masse fixée près d'une extrémité de la corde. Bien qu'une certaine inharmonicité fasse partie intégrante du timbre de l'instrument, elle est notoirement trop forte dans le grave des pianos droits. Un tel dispositif, où seuls deux paramètres sont à ajuster (masse et position sur la corde), semble bien adapté pour remédier en partie à un défaut de l'instrument.

Dans le but d'ajouter une nouvelle possibilité sonore à l'instrument G. Weinreich avait proposé d'adjoindre un étouffoir qui laisserait cependant vibrer une des cordes d'un doublet ou d'un triplet. Actionné pendant le son rémanent, lorsque les cordes s'opposent les unes aux autres et ne sollicitent que peu le chevalet, son effet serait de déséquilibrer brutalement cet antagonisme au profit d'une seule corde. La vibration restante d'une seule corde se transmettant alors très efficacement au chevalet, le son est soudainement accentué mais pour une très courte durée. Bien entendu, il s'agit là d'une proposition ayant une implication esthétique et plus complexe à mettre en œuvre.

### *2) Utilisation de nouveaux matériaux pour les marteaux ou la table d'harmonie:*

La caractérisation mécanique fine des marteaux et l'apparition des premiers modèles [21] a rendu possible l'essai de substitution du feutre par des caoutchoucs synthétiques. Les essais en cours [33] ont permis de parvenir à un matériau relativement dur mais ne possédant pas une non-linéarité de raideur (le terme  $\alpha$  dans l'expression  $a\Delta l^\alpha$  de la force) assez forte.

Les recherches menées depuis des années sur la caractérisation des bois ont permis de définir certains critères auxquels doivent satisfaire des matériaux de substitution pour la fabrication d'une table d'harmonie. On a ainsi pu fabriquer des instruments (violon, alto, violoncelle, contrebasse, guitare, luth, harpe, clavecin) qui sonnent de manière parfaitement analogue à des instruments dont la table est fabriquée de manière traditionnelle [34]. Dans le piano, le remplacement du bois par un matériau composite n'a pas encore été fait pour la table entière mais seulement pour ses barres. La table barrée ainsi obtenue possède la même raideur à la flexion en tous les points du chevalet et sonne correctement, une fois montée sur un instrument. Ces expériences de substitution sont actuellement poursuivies dans le même esprit que ce qui a été réalisé avec succès sur d'autres instruments.

Au delà de la reproduction de ce qu'on sait déjà faire, l'adoption de nouveaux matériaux a deux intérêts potentiels : l'un économique et l'autre musical. Pour parvenir à donner une bonne qualité sonore à un instrument, le facteur doit procéder à des ajustements en fonction des caractéristiques du bois dont il s'est servi pour chaque instrument en particulier. Cet obstacle à la production industrielle de qualité peut être partiellement levé par l'utilisation de matériaux de synthèse, dont les caractéristiques mécaniques sont reproductibles. L'étude scientifique du fonctionnement de la table d'harmonie sera aussi considérablement

facilitée par cette reproductibilité. La compréhension de ce fonctionnement est une des voies pour la recherche d'améliorations musicales de l'instrument.

### 3) *Les pianos automatiques : anciens et nouveaux.*

Depuis longtemps existent des dispositifs permettant de coder, sous forme de perforations de bandes de papier, une partie des éléments du jeu dans leur déroulement temporel. Après l'enregistrement par un interprète, il est alors possible de faire rejouer le piano sous la seule commande de ces rouleaux. De tels pianos mécaniques ont permis de saisir et de conserver des interprétations prestigieuses (ou non ...) du début du siècle et de les restituer dans des conditions infiniment meilleures que les enregistrements acoustiques de l'époque. Certaines limites existaient cependant, en particulier dans la différenciation des niveaux de jeu des notes attaquées simultanément. En prenant en compte sur chaque note individuellement tous les paramètres significatifs du jeu, deux systèmes récemment commercialisés [34] ont tiré un parti spectaculaire de l'analyse fine du fonctionnement de la mécanique du marteau. La vitesse du marteau est mesurée durant la frappe au moyen d'un détecteur optique. La séquence des vitesses de chaque marteau est mémorisée sur micro-ordinateur pendant la phase "enregistrement". Un étalonnage soigneux indique le courant à faire passer dans un actuateur électromagnétique du mécanisme pour communiquer au marteau une vitesse donnée. Avec ces informations, on peut faire rejouer le système avec un très grand degré de fidélité au jeu original. Le contrôle de l'étouffoir est effectué par des moyens similaires, ainsi que celui des pédales. Entre l'enregistrement et la restitution, on peut bien évidemment traiter les informations mémorisées et corriger une note, sa nuance, etc... Les applications au travail de studio sont nombreuses.

L'expérience montre que la phase d'étalonnage est essentielle pour obtenir une fidélité satisfaisante.

## CONCLUSION

On sait à présent expliquer les principales caractéristiques acoustiques du piano : constituants du transitoire d'attaque, contenu spectral, variation de la sonorité en fonction de la dynamique, évolution temporelle de chaque partiel, rayonnement par la table d'harmonie. Les critères fins de caractérisation de la qualité de l'instrument échappent encore à la modélisation. Aux mesures et modélisations menées jusqu'à présent par les physiciens s'ajoutent maintenant des tentatives de modifier les éléments du piano eux-mêmes, à la fois pour en comprendre plus finement le fonctionnement et pour les améliorer. Il est intéressant de constater à quel point la reproduction par synthèse sonore de sons de piano suit de près la compréhension du comportement de ses constituants acoustiques.

### Remerciements :

Je remercie chaleureusement Xavier Rodet, Claude Valette, Jean-Christophe Radier et Charles Besnainou qui m'ont apporté des informations précieuses pour la préparation de cet article.

### Références :

- [1] P. Schaeffer, *Traité des objets musicaux* (Le Seuil, Paris, 1966), XIII - 4, p. 236.
- [2] X. Boutillon, "Le fonctionnement des instruments à cordes libres", thèse de 3ème cycle de l'Université Paris XI (1984).
- [3] Morse et Ingard, *Theoretical Acoustics* (McGraw Hill, New York 1968), pp. 358, 615, 622.
- [4] C. Cuesta et C. Valette, "Évolution temporelle de la vibration des cordes de clavecin", *Acustica* **66**, 37-45 (1988).
- [5] outre les références [3], [2] et [6], voir en général *Musical acoustics - piano and wind instruments*, édité par E.L. Kent pour *Benchmark papers in acoustics* (Dowden, Hutchinson & Ross, Stroudsburg, PA, 1977) ainsi que certains passages du livre de S. Cordier *Piano bien tempéré et juste orchestre* (Buchet-Chastel, Paris, 1982).
- [6] M. Podlesak et A.R. Lee, "Dispersion of waves on piano strings", *J. Acoust. Soc. Am.* **83**, 305-317 (1988).
- [7] M. Podlesack et A.R. Lee, "Effect of inharmonicity on the aural perception of initial transients in low bass tones", *Acustica* **68**, 61-66 (1989).

- [8] X. Boutillon et al., "Etude expérimentale des cordes pourvues de raideur", C. R. Acad. Sc. Paris, t. 298, Série II-19, 815-820 (1984).
- [9] E. Leipp, *La harpe celtique*, bulletin G.A.M. 73 (1974).
- [10] H. A. Conklin, Jr. "Tuning the longitudinal mode of piano strings", J. Acoust. Soc. Am. 73 S1, S84 (résumé) (1983).
- [11] Morse et Ingard, op. cit., p. 861.
- [12] C. Cuesta et C. Valette, "Le transitoire d'attaque des cordes de clavecin", *Acustica* 68, 112-122 (1989).
- [13] G.V. Anand, "Large-amplitude damped free vibration of a stretched string", J. Acoust. Soc. Am. 45, 1089-1096 (1969).
- [14] G. Weinreich, "Coupled piano strings", J. Acoust. Soc. Am. 62, 1474-11484 (1977), abrégé et traduit dans "Comment vibrent les cordes d'un piano" (*Sons et Musique*, Belin, 1980).
- [15] A. Oledzki, "Dynamics of piano mechanisms", *Mech. Machine Theory* 7, 373-385 (1972).
- [16] H. Suzuki, "Vibration analysis of a hammer-shank system", J. Acoust. Soc. Am. 81 S1, S83 (résumé) (1987).
- [17] X. Boutillon, "Model for piano hammers : Experimental determination and digital simulation", J. Acoust. Soc. Am. 83, 746-754 (1988).
- [18] D.E. Hall, "Piano string excitation : ...", J. Acoust. Soc. Am. 79, 141-147 (1986), 81,535-546 et 547-555 (1987) (important e étude bibliographique). Voir aussi D.E. Hall et P. Clark, "The question of missing modes", J. Acoust. Soc. Am. 82, 1913-1918 (1987).
- [19] H. Suzuki, "Modeling of a piano hammer", J. Acoust. Soc. Am. 78 S1, S33 (résumé) (1985).
- [20] D.E. Hall et A. Askenfelt, "Piano string excitation V : spectra for real hammers and strings", J. Acoust. Soc. Am. 83, 1627-1638 (1988).
- [21] H. Suzuki, "A model analysis of force-deformation characteristics of a piano hammer", J. Acoust. Soc. Am. 83 S1, S119 (résumé) (1988).
- [22] K. Wogram, "Acoustical research on pianos. I. Vibrational characteristics of the soundboard", *Das Musikinstrument* 24, 694, 776, 872 (1981). Reproduit dans *Musical acoustics - Selected reprints*, édité par T.D. Rossing, American Association of Physics Teachers (1988).
- [23] J. Kindel et I-Chih Wang, "Vibrations of a soundboard : Modal analysis and finite element analysis", J. Acoust. Soc. Am. 81 S1, S61 (résumé) (1987).
- [24] H. Suzuki, "Vibration and sound radiation of a piano soundboard", J. Acoust. Soc. Am. 80, 1573-1582 (1986).
- [25] J. Meyer, *Acoustics and the performance of music* (Ed. Das Musikinstrument, Francfort 1978), pp. 99-103.
- [26] M.A. Spencer, "The physical and psychological effect(s) of lid position(s) of the piano on volume and on harmonics", I.C.A. Proc., K2-2 (1986).
- [27] X. Serra, *A system for sound analysis / transformation / synthesis based on a deterministic plus stochastic decomposition*, thèse de doctorat, CCRMA-Université de Stanford (1989).
- [28] J. Laroche, *Etude d'un système d'analyse et de synthèse utilisant la méthode de Prony - Application aux instruments de musique de type percussif*, thèse de doctorat de l'E.N.S.T. (1989).
- [29] Y. Potard, P.F. Baisnée, J.B. Barrière, "Experimenting with models of resonance produced by a new technique for the analysis of impulsive sounds", *ICMC Proc.*, 269 -274(1986).
- [30] G. Weinreich, programme *Pianofortran* (I.R.C.A.M., Paris 1980).
- [31] J.M. Adrien, *Simulation numérique de systèmes vibrants complexes - Application à la synthèse sonore par modèle physique*, thèse de doctorat de l'Université Paris VI (1989).
- [32] H. Suzuki, "Control of inharmonicity by the addition of a point mass", J. Acoust. Soc. Am. 84 S1, S134 (résumé) (1988).
- [33] A. Askenfelt et D.E. Hall, "Properties of piano hammers", *ISMA Proc.* (édité par la Catgut Acoustical Society), p.79 (1989).
- [34] C. Besnainou et S. Vaiedelich, "About the mechanical properties of wood used in instrument-making and their replacement by carbon fibers composite" *ISMA Proc.* (édité par la Catgut Acoustical Society), p.49 (1989). Voir aussi brevet CNRS n° 86 08 405 Q365 O.
- [34] H. Vincent, "Computer-based piano performance reproduction system", J. Acoust. Soc. Am. 81 S1, S29 (résumé) (1987) : présentation du système commercialisé par Bœsendorfer ; un système proche existe chez Yamaha.