Université Pierre et Marie Curie, Paris 6

Effets de la mise en charge de la table d'harmonie du piano

Adrien Mamou-Mani

Mémoire de stage de DEA Acoustique, Traitement du Signal et Informatique Appliqués à la Musique

Laboratoires d'accueil :
Laboratoire de Modélisation en Mécanique (Paris 6, CNRS).
Laboratoire d'Acoustique Musicale (Paris 6, CNRS, Ministère de la Culture).

Responsables :

Joël Frelat (LMM)
Charles Besnainou (LAM)

Remerciements

Un grand merci à :

Joël Frelat et Charles Besnainou pour la patience, la disponibilité et l'énorme capacité d'écoute dont ils ont fait preuve.

Danièle Dubois pour l'initiation aux méthodes psycholinguistiques qu'elle m'a gentiment faite. J'espère que ce n'est qu'un début…

Pierre Leveau, qui m'a donné d'excellents conseils tout au long du stage. Un voisin de luxe !

Michelle Castellengo, Maëva Garnier, David Sotiropoulos et Julien Bensa. Ils ont donné de leur temps et de leur culture pianistique pour élaborer un ensemble riche d'extraits musicaux pour les tests.

Tous les sujets des tests perceptifs, qui ont joué le jeu et pris le temps de répondre à toutes ces questions.

Sans oublié bien sûr les équipes du LAM et du LMM et tous les stagiaires, qui ont contribué à l'ambiance chaleureuse et très agréable des laboratoires.

Table des matières

Remerciements ... 2
Table des matières ... 3
Chapitre 1 ... 5
Introduction ... 5
1.1 Les savoirs-faire liés à la table d'harmonie ... 5
1.2 Position du problème ... 6
1.2 Descripteurs ... 6
1.2.1 La mobilité ... 6
1.2.2 Le son rayonné ... 7
1.2.3 Les descripteurs verbaux sur la qualité ... 7
Chapitre 2 ... 8
Modélisations ... 8
2.1 Modélisations numériques ... 8
2.1.1 Poutre précontrainte ... 8
2.2 Mesures sur le modèle expérimental ... 14
2.2.1 Protocole ... 14
2.2.2 Résultats et comparaison avec le modèle ... 16
Chapitre 3 ... 18
Mesures de mobilités d'un piano ... 18
3.1 Protocole ... 18
3.1.1 Description du piano et des états de charge ... 18
3.1.2 Méthode d'excitation ... 20
3.2 Résultats ... 20
3.2.1 Pour une charge ... 20
3.3 Tendances ... 23
Chapitre 4 ... 26
Constitution de bases de données ... 26
4.1 Enregistrement de sons rayonnés ... 27
4.1.1 Protocole pour chaque état de charge ... 27
4.1.2 Objectif ... 27
4.2 Tests perceptifs ... 27
4.2.1 Protocole ... 27
4.2.2 Remarques sur les tests ... 28
4.2.3 Objectifs ... 28
Conclusion et perspectives ... 29
Bibliographie ... 30
Annexe 1 ... 31

Mobilités au milieu de la poutre pour différentes charges *31*
Annexe 2 ..... *33*
Spectrogrammes de la vitesse du milieu de la poutre soumise à un choc pour deux niveaux d'intensité *33*
Annexe 3 ..... *36*
Mobilités du piano pour 3 charges *36*
Annexe 4 ..... *39*
Consignes du test perceptif *39*
Annexe 5 ..... *40*
Extraits musicaux imposés aux pianistes *40*

Chapitre 1

Introduction

Le LAM et le LMM, en association avec d'autres laboratoires, sont engagés dans un projet pour caractériser les attributs de la qualité sonore du piano. Ils ont reçu pour cela une subvention propre de l'université Paris 6 (BQR 2003). Ce projet interdisciplinaire réunit des recherches en psycholinguistique, mécanique, acoustique, matériaux, intelligence artificielle en vue d'élaborer une méthodologie permettant la conception mécanique en relation avec des problématiques de la perception. Ce stage s'inscrit dans cette « philosophie », en traitant de l'aspect mécanique, tout en ayant comme perspective la qualité sonore.

Tout le monde s'accorde pour remarquer que les savoirs-faire subtils des facteurs d'instruments concentrent en définitive la qualité du point de vue de ses résultats. Plusieurs travaux de recherche ont déjà apporté leur contribution sur la caractérisation de l'accord, de l'harmonisation des marteaux ou encore de l'interaction marteau corde. Le présent projet explore les effets de la précontrainte et de la charge du point de vue mécanique.

1.1 Les savoirs-faire liés à la table d'harmonie

La table d'harmonie du piano permet de transformer la vibration des cordes en son rayonné. Cette transformation ne se fait pas passivement. La table va agir comme un filtre, amplifiant certaines fréquences au détriment d'autres. Les caractéristiques de ce filtre sont dues aux propriétés géométriques et mécaniques de la table d'harmonie.

Le facteur de piano a à sa disposition plusieurs moyens de réglage lors de l'élaboration de la table :

- Le choix du matériau
- Le choix d'une architecture
- La mise en précontrainte de la table
- La mise en charge de la table

La mise en précontrainte consiste à bomber la table initialement plate. Plusieurs méthodes permettent d'atteindre ce but, selon le niveau de galbe souhaité par le facteur [1]. Ce bombage, suivi du collage sur le contour de la table, impose des contraintes internes à la table.

La hauteur relative du cadre par rapport à la table impose une composante verticale de la tension des cordes au niveau du chevalet que l'on nomme la charge. Celle-ci est généralement comprise entre 0.5 et 3% de la tension totale[2], soit entre environ 1000N et 6500N pour les 256 cordes de l'instrument.

Pour les facteurs, l'optimisation entre précontrainte et charge est l'étape déterminante sur laquelle va s'adosser les autre réglages de la qualité.

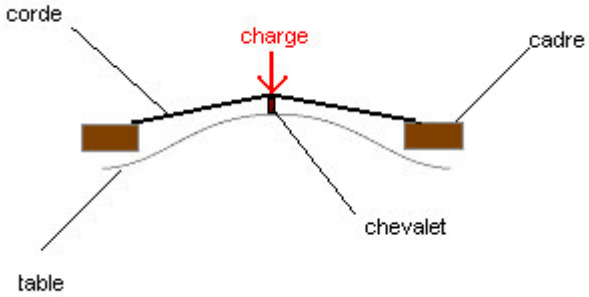


Fig1 : Schéma très simplifié de la table précontrainte et chargée

1.2 Position du problème

Les facteurs de piano portent une attention toute particulière à l'application de la charge, mettant au point divers procédés de contrôle. « M. Fazioli (facteur de piano réputé) considère que la mise en charge est une opération critique. Quand elle est réalisée avec soin, elle contribue à une homogénéisation de la qualité tonal d'un instrument à l'autre »[7], ou encore « Un réparateur doit être capable de réaliser la charge optimale. Trop de charge provoque une attaque intense mais une décroissance rapide, tandis qu'une faible charge induit un long sustain mais un niveau sonore faible »[8] Leur avis reste toutefois assez partagé sur son rôle.

De la même manière, les travaux de recherche n'ont pas encore abouti. Pour N.H. Fletcher et T.D. Rossing, évoquant brièvement la charge statique « The static and acoustic functions are not totally independent of one another »[3]. Mais ils n'en disent pas plus. On peut toutefois retrouver des tentatives d'explications dans quelques travaux. Nakamura [4] a mesuré la mobilité (terme explicité au paragraphe suivant) avant et après chargement de la table. Il a observé un glissement vers les aigus des pics de mobilité. Conklin[5], tout en confirmant les dires de Nakamura, ajoute que l'amplitude de ces pics décroît après chargement. Mais ces deux expériences ne prennent pas en compte des petites variations de charge. Par contre, Wogram [6] a tenté de modifier beaucoup plus finement la charge en diminuant la valeur du diapason d'un demi ton puis d'une octave. Il n'a observé aucun effet sur la mobilité.

Nous proposons une méthodologie basée sur la confrontation entre modèle numérique et mesures, la modélisation rendant compte des tendances et des ordres de grandeurs des effets de la précontrainte et de la charge de la table.

1.2 Descripteurs

Les effets de la charge et de la précontrainte se matérialisent par des comportements tendanciels de descripteurs. Nous en avons choisi 3, qui ne seront pas traités également.

1.2.1 La mobilité

Les mesures de mobilité sont le gros du travail effectué durant ce stage. La mobilité est l'inverse de l'impédance, elle peut donc être définie par :

$$\frac{1}{Z} = \frac{v}{f}$$

Avec Z= impédance
v= vitesse
f= force

La mobilité est donc la capacité d'une structure à se mouvoir sous l'action d'une force extérieure. La mobilité sera grande si la structure prend une vitesse importante pour une force appliquée faible, et au contraire petite quand elle nécessite une force importante pour vibrer. Dans notre cas, la mobilité au chevalet projetée sur l'espace des fréquences est une grandeur intéressante. En effet, elle indique comment se fait la transmission des composantes fréquentielles de la vibration de la corde à la table d'harmonie. On retrouve ainsi l'analyse de la mobilité au chevalet dans de nombreuses recherches sur le piano.

En confrontant un modèle numérique à une expérimentation, nous testerons l'hypothèse que les contraintes internes de la table d'harmonie, issues de la charge et de la précontrainte initiale ont des effets sur la mobilité.

1.2.2 Le son rayonné

Le rôle de la table d'harmonie est le rayonnement. Il est donc indispensable d'étudier les conséquences des propriétés imposées à la table sur le son rayonné. Ce stage a permis la constitution d'une base de données de sons rayonnés du piano du LAM dans divers états de charge.

1.2.3 Les descripteurs verbaux sur la qualité

Nous avons mis au point un test permettant la caractérisation des effets de la charge sur la perception de la qualité sonore du piano d'experts pianistes et facteurs.

Chapitre 2

Modélisations

Souhaitant étudier le rôle spécifique de la charge, nous avons choisi un modèle global, c'est-à-dire considérant la table à partir de propriétés mécaniques globales, sans modéliser les rôles spécifiques de la géométrie, des chevalets, ou encore des barrages. Le modèle de poutre, très simple, permet d'introduire facilement des contraintes internes et un chargement.

2.1 Modélisations numériques

Les modélisations numériques ont été faites avec Cast3M (CEA), logiciel de modélisation par éléments finis. Après discrétisation de la géométrie et des équations des milieux continus par cette méthode, nous ramenons le calcul des vibrations libres à la résolution du système d'équations aux valeurs propres suivant :

$$M\ddot{u}+Ku=0$$

avec : u = vecteur des déplacements approchés
K = matrice de rigidité globale
M = matrice des masse globale

En posant $u=V_0\exp(i\omega t)$, l'équation ci-dessus se réduit à :

$$\left[-\omega^2 M+K\right]V_0=0$$

qui n'a de solution $V_0\neq 0$ que si

$$\det\left[K-\omega^2 M\right]=0$$

La résolution de cette dernière équation nous permet d'obtenir, si n est l'ordre des matrices M et K, au plus n valeurs pour ω réelles et positives, ces ω_i étant les pulsations propres de vibration de la structure (et donc les f_i les fréquences propres). Les n vecteurs propres associés $\{u_i\}$ sont aussi réels : ce sont les modes propres de vibration de la structure.

2.1.1 Poutre précontrainte

2.1.1.1 Description (entamée par Audrey Vastroux et Jonathan Gilad [9])

Un modèle de poutre, en forme d'arc de cercle initialement, est mis en contrainte grâce à l'application de conditions aux limites : encastrées et tangentes horizontales (grâce à une rotation des extrémités, voir figure n°1). La prise en compte de ces contraintes pour un calcul de modes propres est faite en ajoutant à l'équation précédente le terme K_σ , rigidité ajoutée par les contraintes :

$$\det\left[K + K_\sigma - \omega^2 M\right] = 0$$

La poutre est ensuite chargée en son centre par une force verticale, ce qui ajoute d'autres contraintes $K_{\sigma f}$ au système. L'équation des vibrations libres résolue par Cast3M est donc :

$$\det\left[K + K_\sigma + K_{\sigma f} - \omega^2 M\right] = 0$$

Elle est alors excitée en son centre par une pseudo-impulsion, ce qui revient à résoudre l'équation des vibrations forcées, projetée sur base modale :

$$(K + K_\sigma + K_{\sigma f})u + M\ddot{u} = F(t)$$

La vitesse récupérée au centre de la poutre est, à une constante près (due à l'amplitude de la force), la mobilité de la poutre en ce point. Il est alors possible d'établir des tendances de mobilité en fonction de la charge.

Le changement géométrique entre la forme initiale (arc de cercle) et la forme obtenue après application des premières conditions aux limites (« collage ») sont considérés suffisamment importants pour ne pas être négligés. Nous travaillons donc dans l'hypothèse de grands déplacements (mais petites déformations), ce qui signifie que nous procédons à une réactualisation géométrique, ainsi qu'au transport des contraintes initiales.

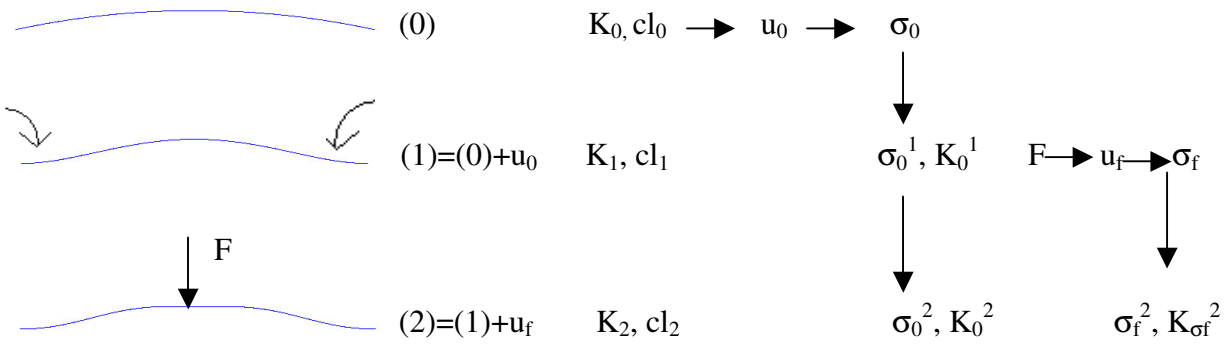


Fig1 : Différentes étapes du calcul numérique

Ces hypothèses sont nécessaires pour prendre en compte les non linéarités de type géométrique. La dernière étape ((1)⟶(2)) sera seulement étudiée sous l'hypothèse linéaire à contraintes initiales.

2.1.1.2 Influence des contraintes internes

Commençons par étudier l'influence de la première étape, la mise en contrainte initiale de la poutre (0)⟶(1) par la rotation des extrémités. Pour cela, nous avons fait 2 modélisations : une poutre sans contrainte dans la forme (1) et une avec les contraintes dues au collage. Nous pouvons ainsi comparer les géométries et les fréquences des modes dans ces deux cas.

- Influence sur la forme des modes

La forme et l'ordre des dix premiers modes propres de la poutre restent inchangés. En effet, la forme dépend principalement de la géométrie du système, qui n'a subit aucune modification.

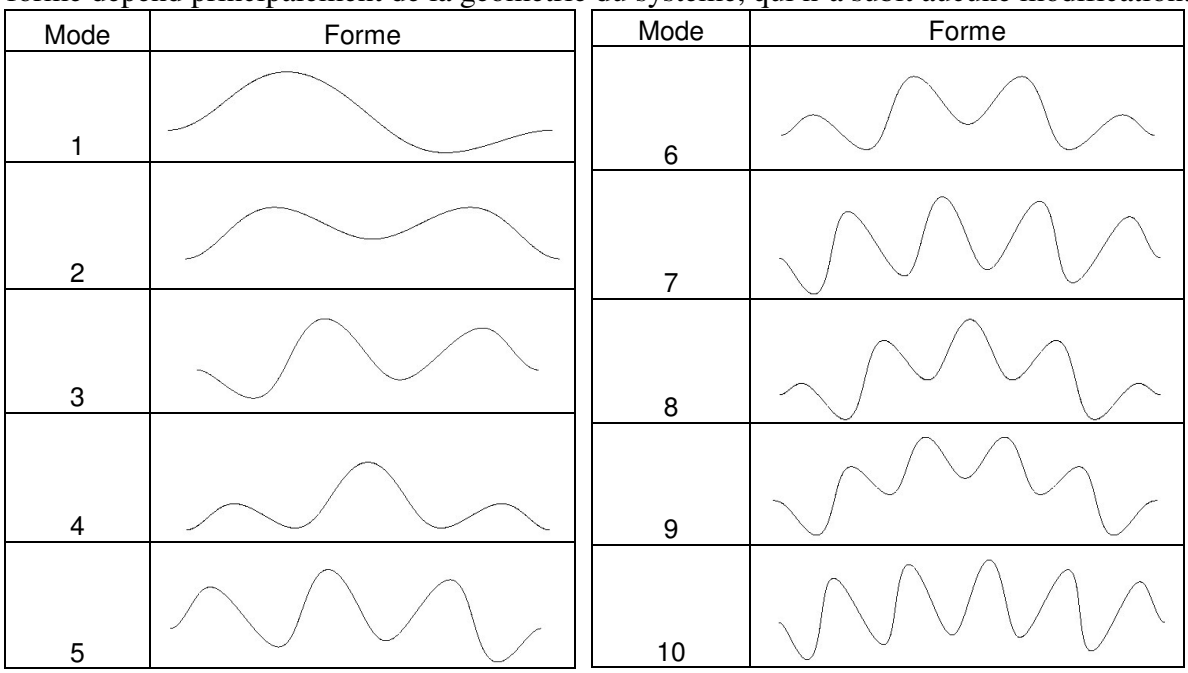


Fig2 : forme des dix premiers modes, avec ou sans contrainte

Vue la complexité de leur forme, nous les numéroterons simplement de 1 à 10 pour la suite.

- Influence sur les fréquences propres

Les fréquences propres ont pour leur part varié très nettement. Voici un tableau comparatif de leurs valeurs sans et avec contrainte, associées à leur différence relative = $100 \times \frac{sanscontrainte - aveccontrainte}{sanscontrainte}$

Mode	freq sans contrainte (Hz)	freq avec contrainte (Hz)	différence relative (%)
1	11,2	5,7	49,1
2	18,1	14,5	19,9
3	35,9	31	13,7
4	47,3	42,8	9,5
5	75,1	70,1	6,7
6	91,5	86,8	5,1
7	128,8	123,7	4
8	143,6	139,7	2,7
9	186,6	183,5	1,7
10	196,9	191,7	2,6

Tab1 : Différence entre les fréquences propres pour un modèle de poutre sans et avec contraintes

On observe une chute importante des fréquences des premiers modes propres, qui diminue pour les fréquences plus élevées. Cela peut s'expliquer en calculant le rapport entre la rigidité associée à la contrainte et celle associée simplement à la géométrie. En effet, associées au mode propre (j) (et donc le vecteur de déplacements $u_p^{(j)}$), les grandeurs caractéristiques de vibration sont, outre la fréquence, les scalaires suivants :

- La masse généralisée :

$$m_g^{(j)} = {}^t u_p^{(j)} M u_p^{(j)}$$

- La raideur généralisée :

$$k_g^{(j)} = {}^t u_p^{(j)} K^T u_p^{(j)} \qquad \text{avec } K^T = K_0 + K_\sigma$$

Cette raideur comporte deux termes :

- La raideur de forme :

$$k_{g0}^{(j)} = {}^t u_p^{(j)} K_0 u_p^{(j)}$$

- La raideur additionnelle due aux contraintes initiales (ou raideur « géométrique »)

$$k_{g\sigma}^{(j)} = {}^t u_p^{(j)} K_\sigma u_p^{(j)}$$

Le rapport entre ces deux raideurs généralisées $\frac{k_{g\sigma}}{k_{g0}}$ (établies pour chaque mode) quantifie l'influence des contraintes initiales sur les vibrations libres.

Mode	rapport des rigidités
1	-0,74
2	-0,36
3	-0,26
4	-0,18
5	-0,12
6	-0,1
7	-0,078
8	-0,055
9	-0,033
10	-0,052

Tab2 : rapport des rigidités de contraintes et géométrique

Ces résultats confirment que la contrainte agit sur la raideur modale et ainsi les fréquences modales diminuent.
Remarque : La contrainte étant principalement de compression, la rigidité qui lui est associée est négative, ce qui explique que le rapport de rigidité est négatif.

2.1.1.3 Influence de la charge

La deuxième partie de la modélisation concerne la mise en charge. Comme il a été explicité plus haut, elle a été modélisée comme une contrainte interne supplémentaire, imposée

par une condition de force au milieu de la poutre. Toutefois, cette contrainte implique des différences sensibles de géométrie. Considérant le système dans le domaine d'élasticité linéaire, la force provoque un déplacement du milieu de la poutre qui lui est proportionnel.

charge=0 N charge=20 N

Fig3 : géométrie de la poutre avant et après chargement de 20 N.

- Influence sur la forme des modes

Malgré un changement de forme de la poutre, la géométrie des dix premiers modes propres ne change pas fondamentalement.

- Influence sur les fréquences propres

L'impact sur les fréquences est très net. Les contraintes internes font chuter les fréquences propres. Sur la figure 4 , cette décroissance est quasiment linéaire pour chaque mode.

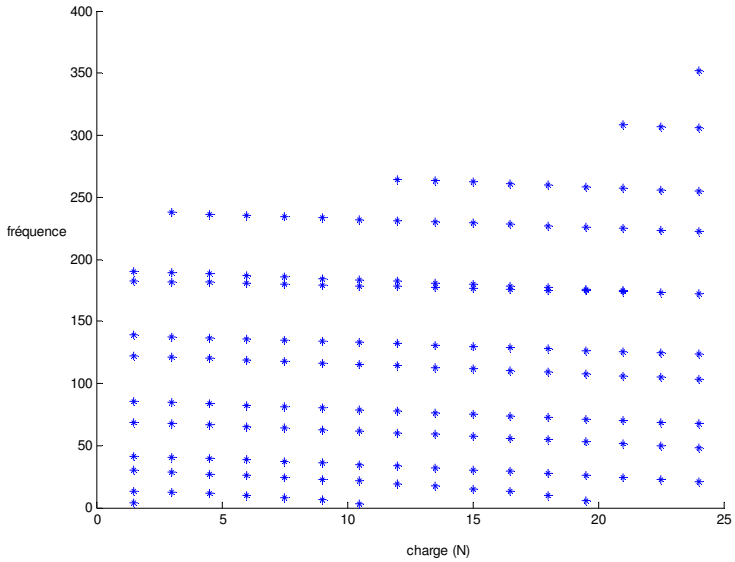


Fig4 : évolution des fréquences propres en fonction de la charge

La décroissance quasi linéaire peut s'expliquer grâce à l'expression des fréquences propres :

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{Rig + \lambda K_{ch}}{Mg}}$$

avec Rig = rigidité sans charge
K_{ch} = rigidité unitaire due à la charge
λ = amplitude de la charge
Mg = masse modale

Ce qui donne, pour $K_{ch} << Rig$

$$f = \frac{1}{2\pi}\left(1+\frac{1}{2}\lambda\frac{K_{ch}}{Rig}\right)\sqrt{\frac{Rig}{Mg}}$$

droite de pente $\frac{1}{4\pi}\frac{K_{ch}}{\sqrt{RigMg}}$ <0 car K_{ch}<0 (contrainte de compression)

(La valeur de K_{ch} dépend du mode considéré)

Ceci a deux types d'effets :

- la disparition de modes (ils deviennent imaginaires mathématiquement)
- la fusion fréquentielle de modes (ici pour les modes 9 et 10 (Fig4))

Ainsi, le mode 1 disparaît à partir d'une charge de 3 N et le mode 2 pour une charge de 21 N. Cette chute des modes peut conduire à des cas très particuliers où deux charges impliquent des fréquences propres voisines mais pour des formes de modes différents.

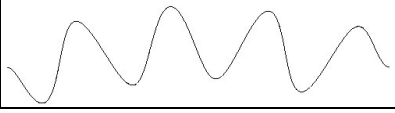
Charge=3N	Charge=18N	Différence fréquentielle relative (%)
		2.5
		2.1
		27.5
		8.5
		23.2

Fig5 : 5 premiers modes pour les charges de 3N et 18N et leur différence fréquentielle.

La figure 5 présente les 5 premiers modes observés pour des charges de 3 N et 18N munies des différences relatives de leur fréquences. Les fréquences propres sont voisines pour des formes de modes différents.

Le rayonnement étant lié à la forme des modes, on peut obtenir un rayonnement différent pour une fréquence quasiment identique en augmentant la charge. Cet élément de directivité devra être analysé et pris en compte dans une étude fine de la qualité sonore.

Remarque concernant la Fig4 : le spectre ne s'enrichit pas de 4 modes de fréquences élevées mais le calcul se faisant sur 10 modes, ils sont pris en compte numériquement lorsque d'autres disparaissent.

- Influence sur l'amplitude des modes

La dernière étape de la modélisation est l'application d'un choc au milieu de la poutre, représenté temporellement par un triangle d'amplitude 1 et de largeur $\frac{2T\min}{10}$ avec Tmin la période du mode de fréquence la plus élevée. Ce choc a donc un spectre plat sur l'ensemble des fréquences considérées.

Il est alors possible d'extraire la réponse en vitesse du milieu de la poutre à ce choc, égale à une constante près à la mobilité du milieu de la poutre. Nous ne nous intéresserons ici et pour toute la suite de ce travail qu'au module de la mobilité.

Sur la figure 6 sont représentées ces réponses pour les charges de 0 à 12 N, les niveaux de gris symbolisant l'amplitude des modes (en linéaire). Les modes ayant un nœud de vibration au centre de la poutre ne sont évidemment pas excités.

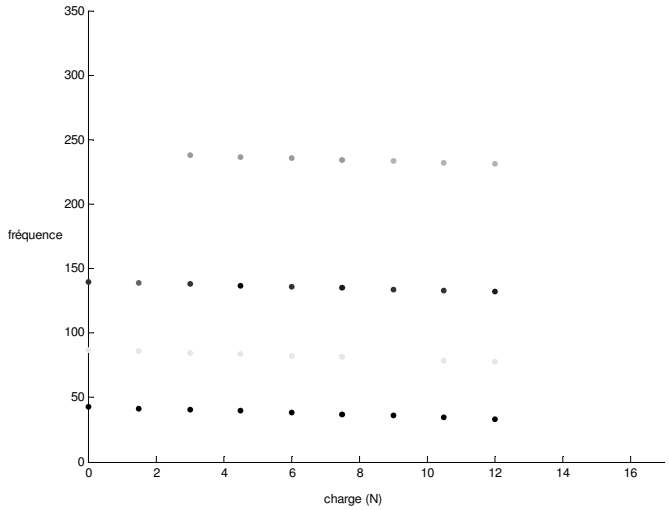


Fig6 : Mobilité au milieu du modèle de poutre pour des charges variant de 0 à 12 N.

Les modes 2, 4, 6 et 11 sont excités significativement. Leur amplitude relative ne varie pas de manière sensible avec l'augmentation de charge. La charge ne semble donc pas avoir d'effet sur l'amplitude des modes propres.

La charge a donc des effets sur les fréquences propres (décroissance) du modèle de poutre mais pas sur l'amplitude des modes. Nous allons confronter ces résultats à des mesures sur une poutre réelle.

2.2 Mesures sur le modèle expérimental

2.2.1 Protocole

Une poutre de longueur 42 cm a été construite à partir de couches de fibre de carbone, moulée dans un galbe lui donnant un rayon de courbure initial de 1.01 m (une flèche de 2.2 cm). Le système suivant a été utilisé pour contraindre et charger la poutre :

- les extrémités ont été pressées entre une plaque de métal et un support rigide, permettant une rotation et donc une tangente horizontale.
- Une corde orthogonale à la poutre destinée à appliquer la charge.

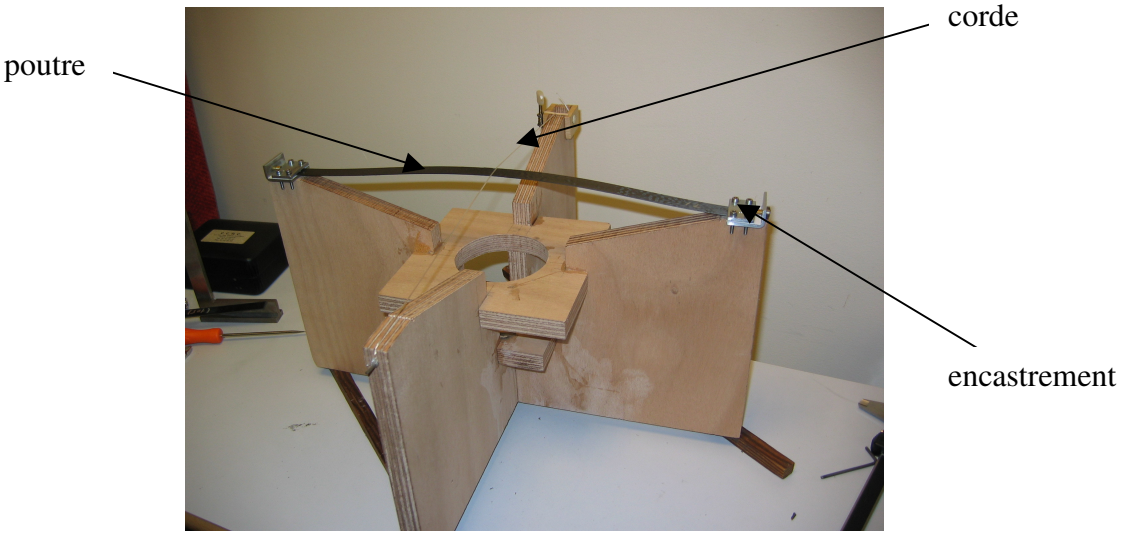


Fig7 : Poutre expérimentale

Des mesures de mobilité au centre de la poutre ont alors été faites. Pour cela, nous avons utilisé un marteau d'analyse modale, comportant un capteur de force, et un accéléromètre. Les deux ont été placés à l'intersection poutre-corde. Une acquisition de ses signaux est alors faite sous Matlab, suivie d'un calcul de mobilité.

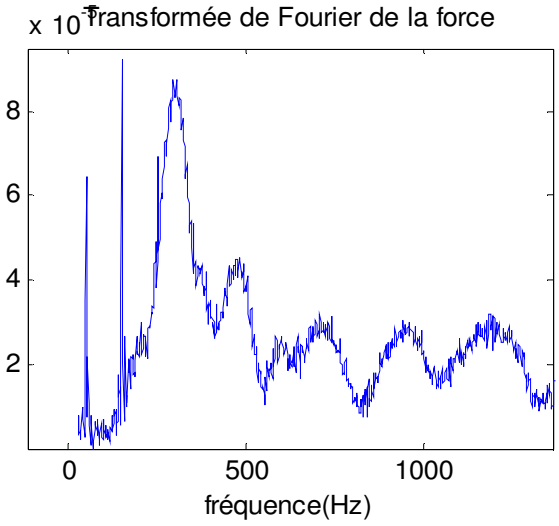


Fig8 : exemple de choc

Le choc en entrée a une caractéristique fréquentielle fortement inhomogène. Nous avons donc choisi comme fenêtre d'analyse [250 Hz,1500 Hz].

2.2.2 Résultats et comparaison avec le modèle

Les mesures ont été faites pour 4 charges différentes. Les enfoncements imposés par les charges sont entrés dans le modèle numérique. Nous pouvons ainsi évaluer les valeurs de ces charges (Tab3).

Enfoncement (mm)	Charge approximative (N)
0	0
0,4	3
0,8	6
1.2	9

Tab3 : Evaluation de la charge d'après l'enfoncement et le modèle

L'ensemble des résultats est consultable dans l'annexe 1. Nous présentons ici un résultat (figure 9) et la synthèse (Fig10).

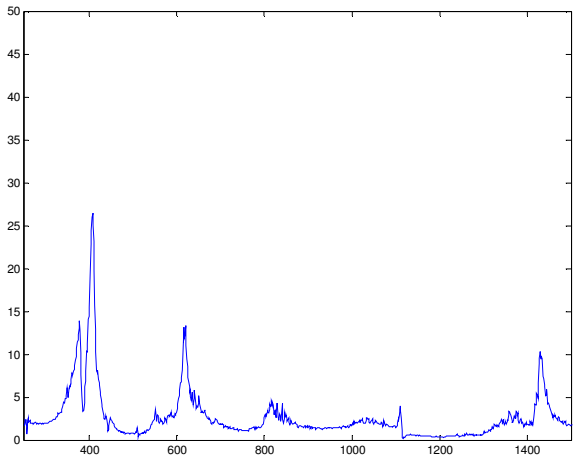


Fig9 : Mobilité au milieu de la poutre sans charge

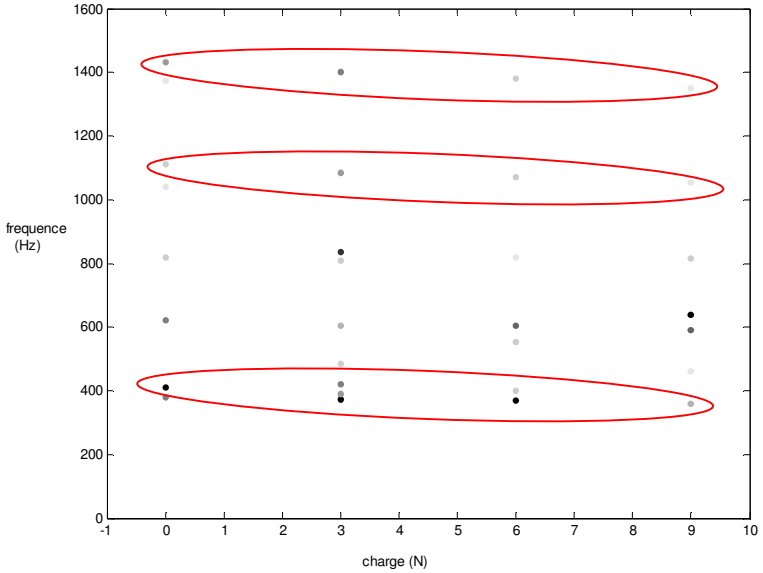


Fig10 : Pics de mobilité pour 4 charges

La figure 10 fait apparaître une décroissance des fréquences des modes avec la charge assortie de l'apparition de nouveaux pics. La chute des fréquences observée dans le modèle est donc retrouvée expérimentalement. On peut émettre l'hypothèse que l'apparition de nouveaux pics et les variations d'amplitude relative des modes proviennent des propriétés du choc.

Remarques sur les mesures

Les résultats présentés ici sont ceux de la poutre avant flambage. Lors des expériences, nous avons constaté deux positions de flambage (1 symétrique et 1 dissymétrique) pour une charge d'environ dix newtons. Le comportement vibratoire dans ces configurations est sans doute très particulier. Le calcul numérique de flambage et de la structure post-flambage nécessite des outils lourds (pas à pas). Nous n'avons donc pas modéliser cette étape mais elle est directement liée à la charge.

Le modèle numérique a donc été validé expérimentalement. Il n'est cependant qu'une modélisation limitée de la table d'harmonie. Les observations que nous avons faites peuvent elles être retrouvées sur une table réelle? C'est ce que nous proposons d'étudier au chapitre suivant.

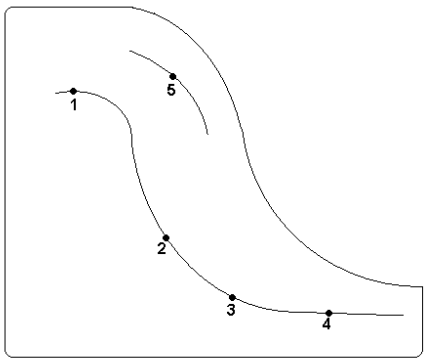
Chapitre 3

Mesures de mobilités d'un piano

Nous avons appliqué 3 charges différentes sur le piano du LAM. Nous avons alors fait des mesures de mobilité au chevalet.

3.1 Protocole

Pour trois charges différentes, des mesures de mobilités ont été faites en 5 positions des chevalets (4 sur le chevalet aigu et 1 sur le grave) d'un piano. Pour cela, nous avons utilisé une tête d'impédance B&K 8001. Cette dernière renvoie les signaux de force et d'accélération qu'elle a subis. Le traitement de ces données sous Matlab donne alors la mobilité du chevalet au point d'application de la force.



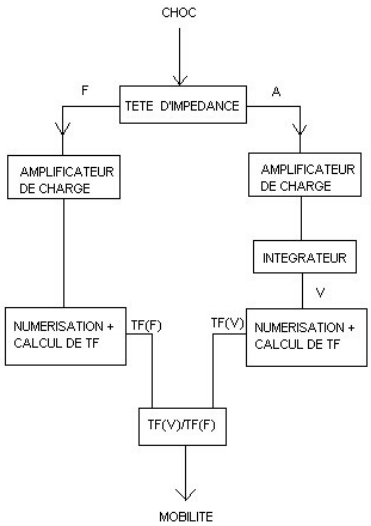


Fig11 : 5 positions de mesure et protocole expérimental

3.1.1 Description du piano et des états de charge

Le Laboratoire d'Acoustique Musicale possède un piano Ibach du début du XX^{e} siècle. Un système de vérins a été mis au point par Eric Marandas, permettant un large éventail de fixation de la hauteur du cadre et donc de charge de la table.

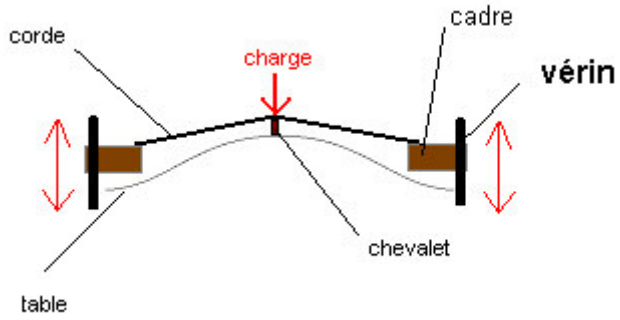


Fig12 : Des vérins permettent de changer la hauteur du cadre

N'ayant pas eu accès au galbe de la table non chargée, il ne nous est pas encore possible de donner les géométries précises de la table précontrainte. Ceci est cependant très important, si l'on en juge par les résultats obtenus sur la poutre (modèle + expérience).

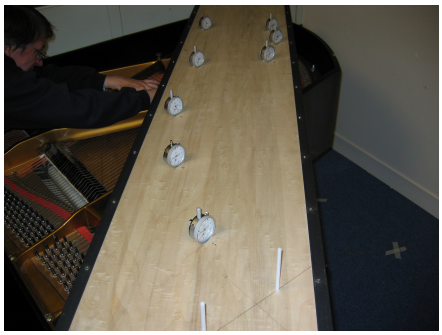


Fig13 : Mesures d'enfoncement à mettre ultérieurement en relation avec le galbe initial de la table

Par contre, nous avons pu avoir une idée de la charge en mesurant l'angle des cordes au chevalet à l'aide d'un comparateur.

Fig14 : Mesures de l'angle des cordes

Numéro note	Charge1 Angle au chevalet (°)	Charge2 Angle au chevalet (°)	Charge3 Angle au chevalet (°)
9	1,07	0.89	2.35
22	0,17	0.29	1.45
30	0.05	0	0.51
40	0.28	NON OBS	0.51
53	0.64	0.26	0.69
63	1.20	0.56	1.79
79	1.15	0	3.06
Angle moyen	0.67	0.33	1.48

Tab5 : Angle des cordes en 7 positions et pour 3 charges

Etant donné que la tension totale des cordes est d'environ 180 kN (mesures faites par E. Marandas), la charge1 est d'environ 2100 N, la charge2 de 1040 N et la charge 3 de 4650 N. Vues les différences d'angles récupérés dans les 5 positions, ces charges ne sont pas réparties uniformément sur la table, mais de manière sensiblement plus importante sur les bords.

Dans la suite, nous nommerons charge0 la charge relativement faible, charge1 la charge moyenne et charge2 la charge forte.

3.1.2 Méthode d'excitation

L'application de la force est faite avec un choc de marteau directement sur la tête d'impédance. Ce protocole a été validé par Ch. Besnainou et J.B. Prunet [10]. Les caractéristiques du marteaux vont être déterminantes pour les propriétés d'excitation. Nous avons opté pour un choc dur, permettant une excitation jusqu'à environ 2kHz.

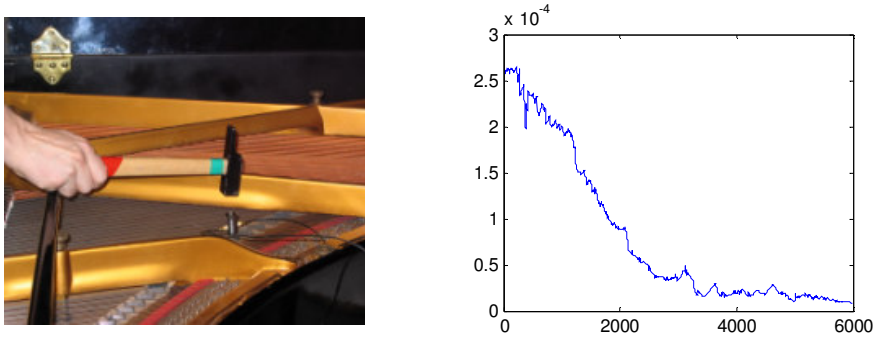


Fig15 : Le choc et son spectre

3.2 Résultats

L'ensemble des résultats se trouvent en annexe 3, seuls ceux pour la position 1 sont analysés ici.

3.2.1 Pour une charge

Pour chaque position, trois mesures de mobilité ont été faites. Voici représentée la moyenne du module de la mobilité pour la position 1, de 50 à 2000Hz :

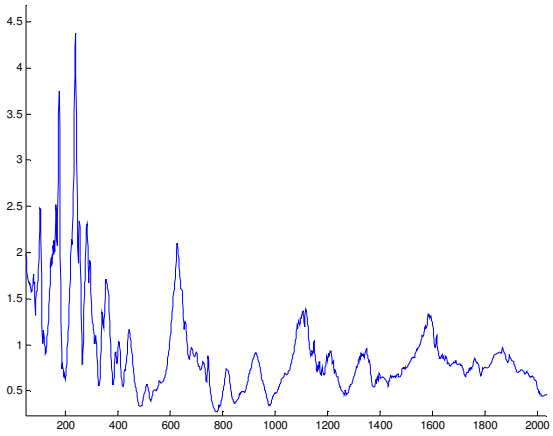


fig16 : Mobilité en position 1 pour la charge 1

Les pics de mobilité représentent les modes propres de vibration du piano observables au point 1. Ils sont très marqués entre 50 et 1000Hz, comme le montre le zoom suivant :

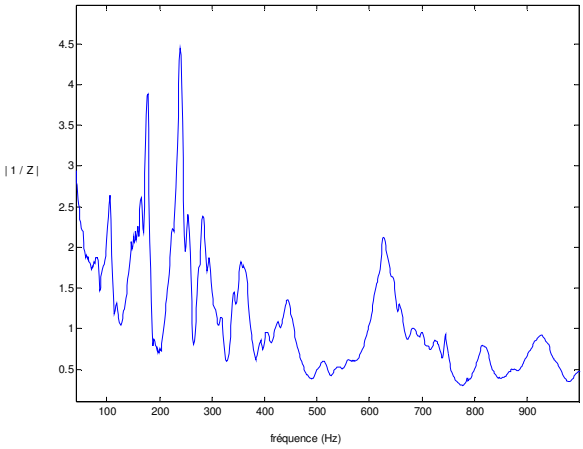


Fig17 : Zoom de la mobilité sur les fréquences [50Hz, 1000Hz]

On dénombre en position 15 modes propres entre 50 et 1000Hz.

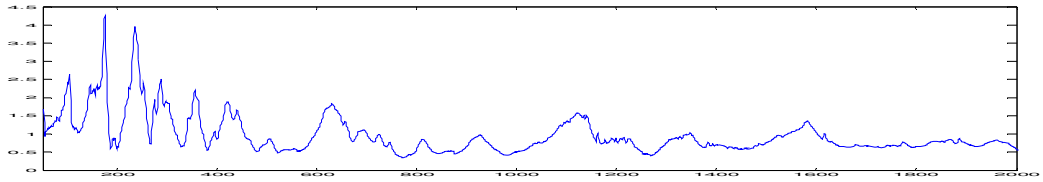
Frequence (Hz)	Amplitude relative
106	0,6
177	0,9
240	1
254	0,5
283	0,5
295	0,4
342	0,3
360	0,4
392	0,2
405	0,2
425	0,2
445	0,3
627	0,5
815	0,2
930	0,2

Tab6 : pics de mobilité observés en position 1 et leur amplitude

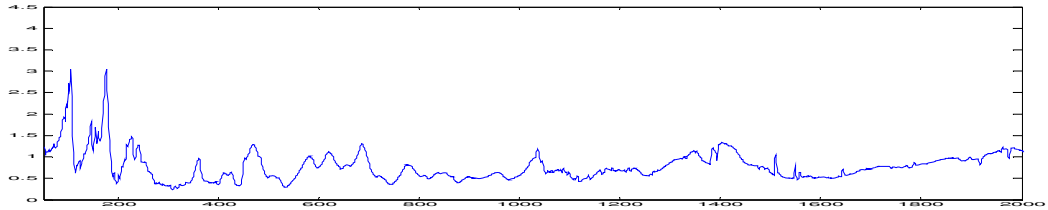
Remarque : Il serait intéressant de comparer ces résultats à ceux d'une analyse modale pour différentes charges d'une table dans son ensemble.

Les mesures de mobilité dans les 5 positions décrivent l'ensemble des modes propres observables sur les chevalets.

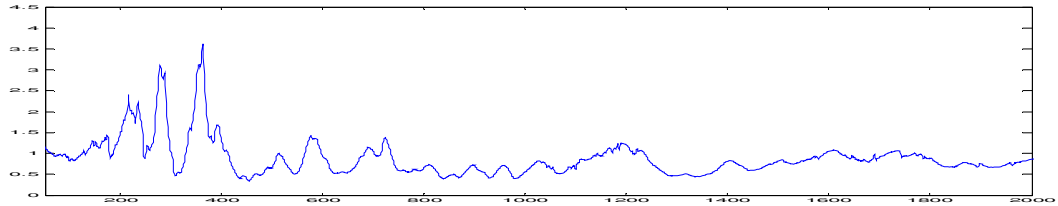
Position 1



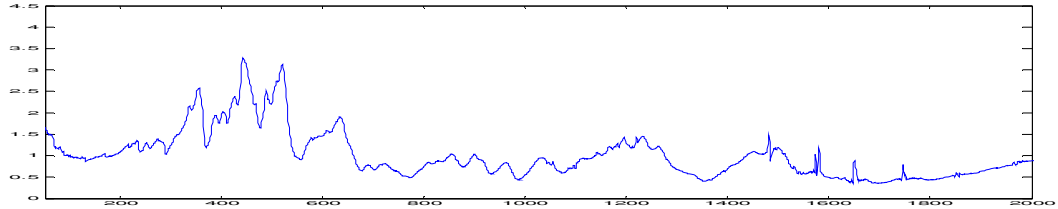
Position 2



Position 3



Position 4



Position 5

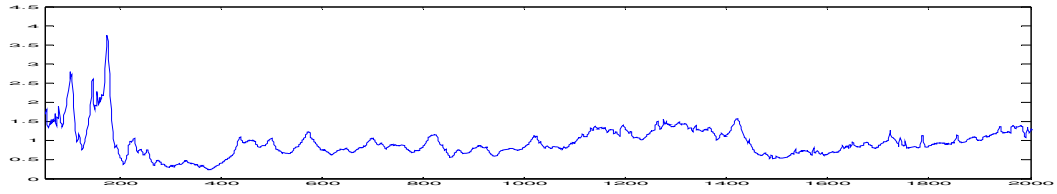


Fig18 : Mobilités pour les 5 positions

Grâce à la figure 18, nous pouvons analyser la mobilité pour différentes tessitures :

- pour le médium grave, médium (positions 1 et 2) : les modes propres < 300 Hz sont sollicités le plus significativement. La mobilité en position 1 est sensiblement plus riche que celle en position 2.
- Pour l'aigu et l'extrême aigu (positions 3 et 4) : les fréquences plus aiguës sont sollicitées.
- Pour le chevalet grave : seuls les modes < 200 Hz sont excités

3.3 Tendances

Nous allons comparer les mobilités obtenues pour les 3 charges en position 1. Pour tester la reproductibilité de nos mesures, nous avons appliqué trois chocs par mesure. Un calcul de variance donne alors un indice de la variabilité de nos mesures. Celle-ci prend sens lorsqu'elle est comparée à la variance des mobilités pour les trois charges

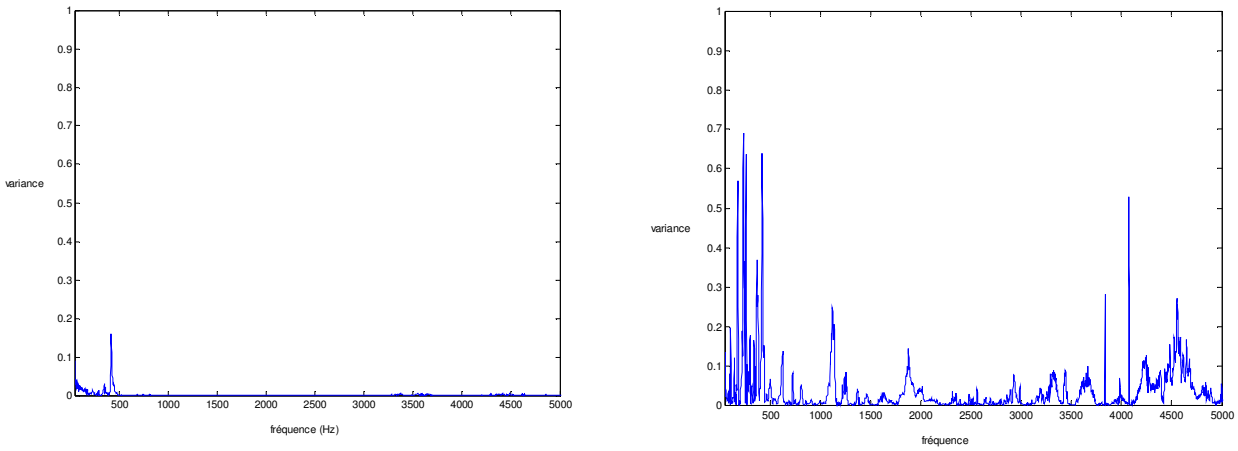


Fig19 : variabilité des mesures en position 1, charge 1 (gauche) et variation observée en position 1 pour les trois charges (droite)

La figure 19 présente ces deux variances. Aux vues des différences d'ordre de grandeur entre la variabilité de nos mesures et les variations de mobilité dues à la charge, nos mesures apparaissent reproductibles, à part dans l'intervalle [410Hz 450Hz]. De la même manière, nous en déduisons que la charge a des effets sur la mobilité au chevalet. Il semble donc légitime d'analyser les tendances observées dans le module de la mobilité, en fréquence et en amplitude.

La figure 20 présente l'évolution des pics de mobilité en position 1 pour les trois charges.

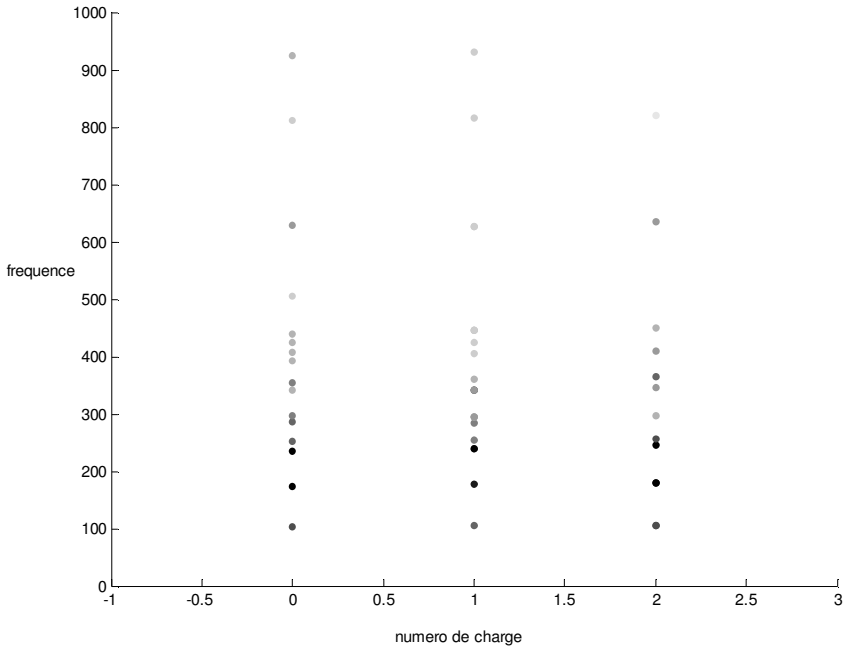


Fig20 : pics de mobilités en fonction de la charge en position 1

Les mobilités pour les 3 charges ont une allure relativement semblable. Le zoom sur la figure 18 montre des variations sensibles des fréquences propres.

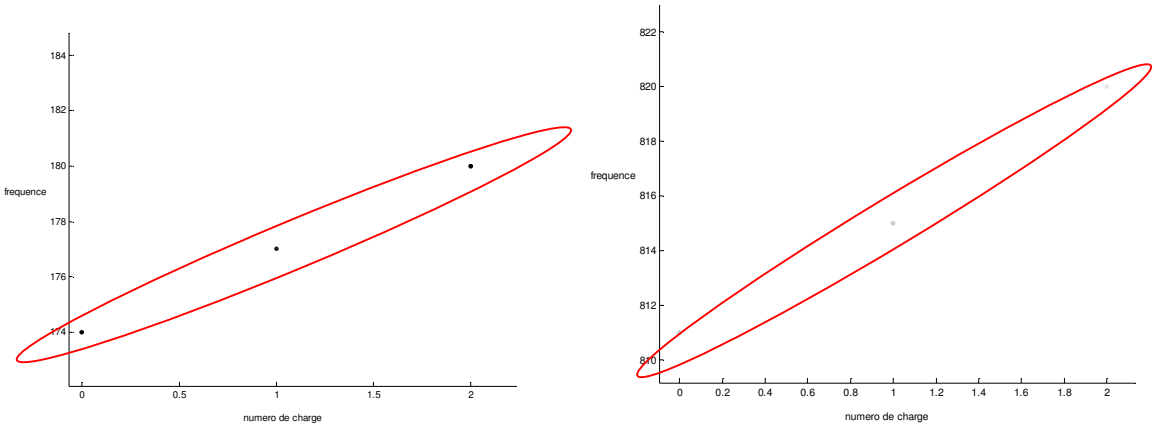


Fig21 : Zoom pour les fréquences dans [170Hz, 185Hz] et [810, 822Hz]

Elles semblent généralement se translater vers des fréquences plus élevées avec l'augmentation de la charge. L'amplitude des modes n'a pour sa part pas changé.

Ces résultats sont en accord avec ceux de Nakamura et de Wogram. Ceux-ci ont constaté une augmentation forte de la fréquence des pics de mobilité pour des très grandes variations de charge (cordes détendues ou tendues normalement).

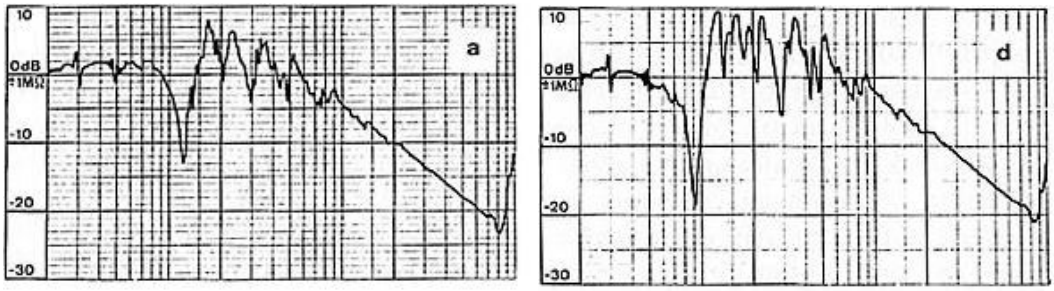


Fig21 : Impédance avec cordes normalement tendues (a) et détendues (d) chez Wogram[6]. Il observe une chute de la première fréquence propre de 115 à 90Hz.

La tendance qu'ils observent dans deux cas extrêmes est ici confirmée pour des variations de charge plus fines.

Le modèle numérique peut expliquer cette augmentation des fréquences. La décroissance des fréquences propres que nous avons observée sur la poutre était due à la charge de **compression** permise par le galbe initial.

Il est fort probable que la table d'harmonie n'est plus galbée, l'instrument étant vieux d'un siècle. La précontrainte d'origine a sans doute disparu. Dans ce cas, l'ensemble des efforts dus à la charge sont en **traction**, ce qui impose une augmentation des fréquences avec l'augmentation de charge.

Les observations mécaniques effectuées, nous avons profité des 3 états de charge pour constituer des bases de données acoustiques et perceptives.

Chapitre 4

Constitution de bases de données

Les travaux présentés précédemment concernent les tendances mécaniques liées directement à un savoir-faire de facteur. Le savoir-faire est un ensemble de connaissances pragmatiques associées à des contingences à la fois économiques, esthétiques, pratiques…. Ce stage s'inscrit dans un projet visant à extraire les relations entre le savoir-faire et la qualité. L'étude mécanique n'est donc qu'un maillon d'une longue chaîne, certes la plus proche du facteur d'instrument, décrivant la matière qu'il manipule, mais éloignée de l'auditeur, dont la réalité provient de sa perception de la production acoustique de l'instrument.

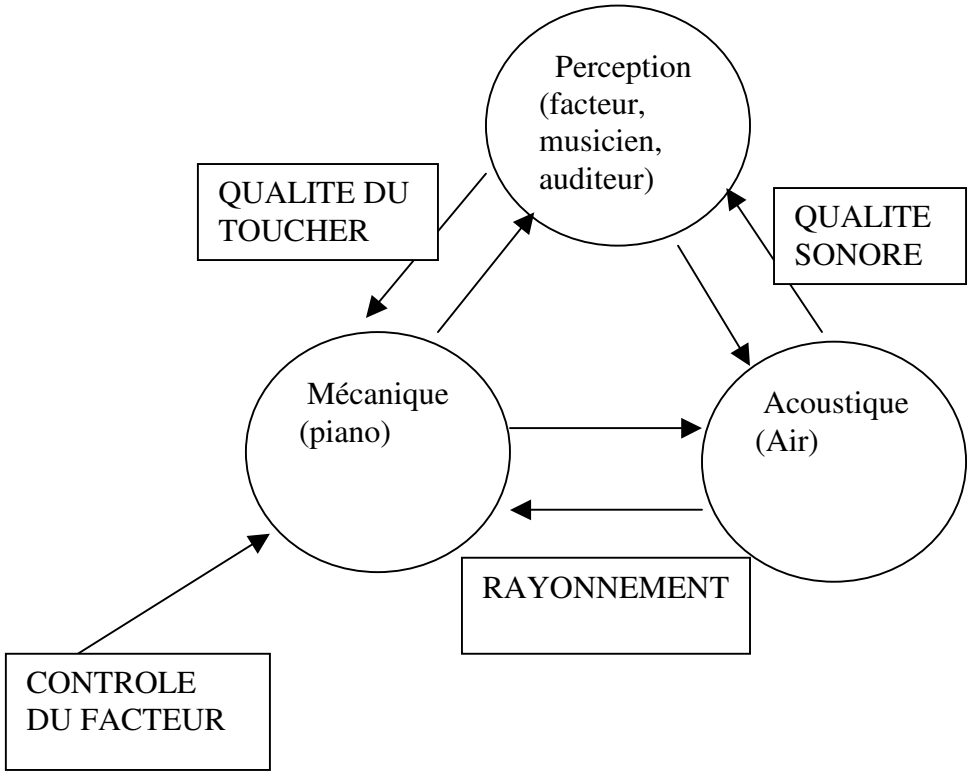


Fig22 : Interdisciplinarité nécessaire dans l'étude de la qualité du piano

Ce stage a été le moyen d'engager ces études mécanique, acoustique et perceptive en parallèle. Ainsi, nous avons fait l'acquisition de données acoustiques et perceptives pour les

trois états de charge qui ont été analysés mécaniquement. Ces bases de données ne sont pas encore analysées mais nous présentons ici les protocoles mis en place.

4.1 Enregistrement de sons rayonnés

4.1.1 Protocole pour chaque état de charge

A l'aide d'un électroaimant et d'un serre-joint, nous avons mis au point une frappe automatique des touches du piano. Contrôlable en tension, elle a permis d'appliquer trois niveaux d'intensité (7V, 16V et 40V). Ceci a permis d'appliquer une dynamique très forte (pianissimo, mezzo forte, fortissimo). L'enregistrement du son a été fait avec des microphones omnidirectionnels sur DAT.

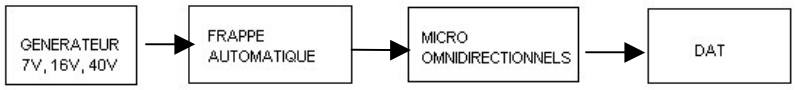


Fig23 : Enregistrement du son

4.1.2 Objectif

Le but de ces mesures est d'évaluer l'influence des variations de charge sur le son rayonné. L'analyse pourra se faire à la fois sur le niveau de l'attaque, les temps de décroissance et la richesse spectrale du signal sonore.

4.2 Tests perceptifs

4.2.1 Protocole

Les sujets sont pris dans deux populations différentes : 4 accordeurs-réparateurs et 5 pianistes.
Pour chaque population, un protocole différent a été mis en place.

- Nous demandons aux accordeurs-réparateurs d'évaluer la qualité du piano sans questionnement directif. Ils jouent ce qu'ils veulent et font les commentaires qu'ils souhaitent.
- Des consignes plus précises sont faites au pianistes (Annexe 1). Elles se décomposent en trois étapes. La première consiste à évaluer la qualité sans questionnement directif (comme pour les accordeurs). La deuxième est constituée d'extraits du répertoire pianistique que les sujets doivent jouer et commenter. Les morceaux ont été sélectionnés pour faire apparaître différentes propriétés perceptives du piano (comme

l'équilibre, l'intelligibilité des traits...). La troisième étape est le jeu de crescendos d'accords, permettant d'évaluer encore plus précisément les caractéristiques en dynamique de l'instrument.

Ces tests sont répétés à l'identique pour les trois mises en charge de la table.

4.2.2 Remarques sur les tests

Les sujets n'ont pas de difficulté particulière à verbaliser sur la qualité.
Les méthodes pour évaluer la qualité sont très différentes selon les deux populations.
La mémoire des tests passés est un repère essentiel pour les sujets. Etant donné que les tests étaient faits à deux semaines d'écart, il leur a souvent été difficile d'émettre des nouveaux jugements, surtout la troisième fois.

4.2.3 Objectifs

Ce test permettra :

- D'établir les différences de stratégie d'évaluation de la qualité selon les populations (accordeurs/pianistes).
- De rendre compte du vocabulaire associé à la qualité.
- D'évaluer les effets de la charge sur la qualité sonore perçue.

Conclusion et perspectives

Nous avons testé l'hypothèse que l'état de précontrainte et de charge avait une influence sur différents descripteurs du piano.

- la mobilité au chevalet

Le modèle numérique de poutre précontrainte permet de comprendre certains effets issus de la mise en charge (diminution des fréquences propres). Les mesures sur le modèle expérimental confirment ces résultats. Il nous a aussi fait prendre conscience de la nécessité de prendre en compte les phénomènes de flambage dans le modèle numérique. Le modèle doit être améliorer dans ce sens ainsi que par la prise en compte de l'amortissement. Les spectrogrammes des résultats expérimentaux, présentés en annexe 2, fournissent des éléments sur l'amortissement.

La modélisation a eu un rôle déterminant pour évaluer les effets de la charge sur la table de piano. Si nous avions simplement observé la mobilité de la table, nous aurions pu passer à côté de ses variations fines. Grâce aux tendances observées sur le modèle, nous avons pu au contraire nous focaliser dessus. Nous en concluons que la charge fait augmenter les fréquences propres de la table d'harmonie du piano d'essai du LAM. Partant des connaissances issues du modèle de poutre, ceci s'explique par une précontrainte nulle de la table. Il reste cependant à ôter complètement le cadre pour vérifier cette hypothèse.

En perspective, un modèle numérique précis de table pourra être encore plus utile. Plus que des tendances, il donnera un ordre de grandeur des effets de la charge et de la précontrainte et ainsi donner une focalisation encore meilleure de nos mesures expérimentales. En remplaçant la table d'origine par une table dont les attributs de précontrainte et de charge seront contrôlés (par exemple en composite), il sera possible d'analyser des comportements mécaniques très fins, en particulier des possibles non-linéarités

- les bases de données acoustiques et perceptives

Avec le dépouillement des tests perceptifs, nous espérons une meilleure compréhension des stratégies d'évaluation de la qualité. La mise en relation avec les données acoustiques (temps de décroissance, spectre…) donnera alors des descripteurs significatifs des influences psycho-acoustiques du couple précontrainte-charge.

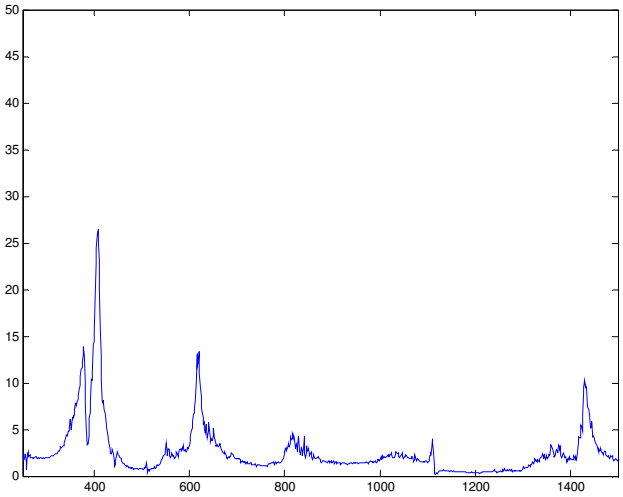
Bibliographie

[1]. Klaus Fenner. La table d'harmonie du piano : Construction neuve et réparation. *Euro Piano* 1998.
[2]. Harold A. Conklin Jr. Design and tone in the mechanoacoustic piano. Part II. Piano Structure. *JASA 100 p.695* (1996)
[3]. Neville H. Fletcher, Thomas D. Rossing. The Physics of Musical Instruments. *Springer*
[4]. Isao Nakamura. The vibrational character of the piano soundboard. *11^{e} ICA vol.4 p385*
[5]. Harold A. Conklin Jr. Piano design factors, their influence on tone and acoustical performance. *Five Lectures on The Acoustics of the Piano. Ed. By Anders Askenfelt.*
[6]. Klaus Wogram. The strings and the Soundboard. *Five Lectures on The Acoustics of the Piano. Ed. By Anders Askenfelt.*
[7]. http://www.overspianos.com.au
[8]. http://www.akpiano.com
[9]. Audrey Vastroux, Jonathan Gilad. Etude non linéaire d'une table d'harmonie du piano. Travail de modélisation et de simulation. Ecole Polytechnique 2004.
[10]. Charles Besnainou, Jean-Baptiste Prunet. Le Point sur la Recherche : Le Piano.

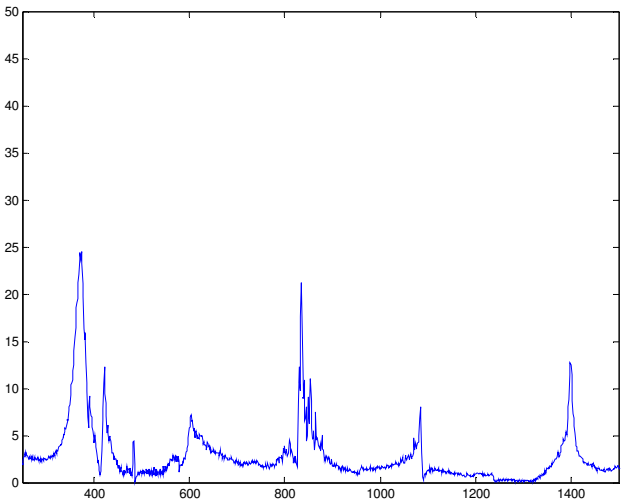
Annexe 1

Mobilités au milieu de la poutre pour différentes charges

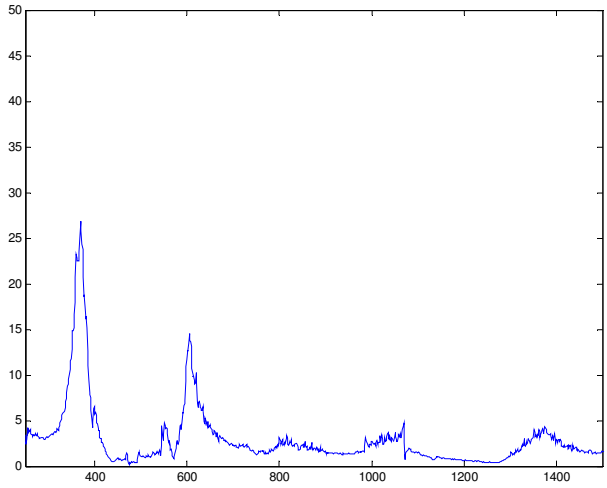
Charge 0 N



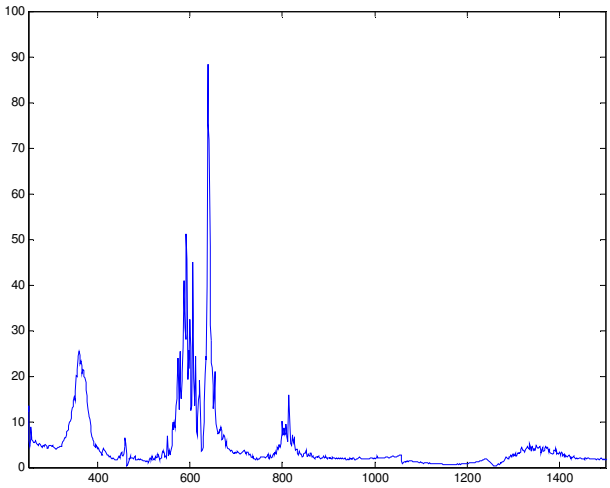
Charge 3 N



Charge 6 N



Charge 9 N

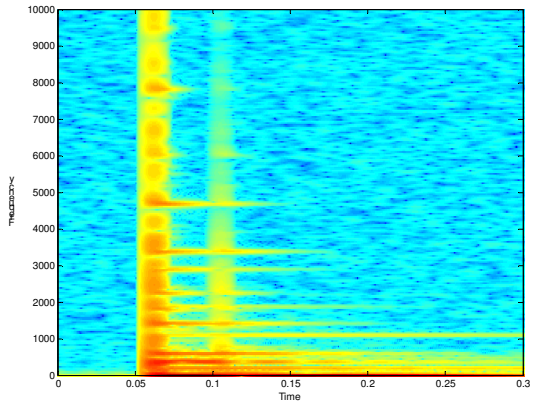


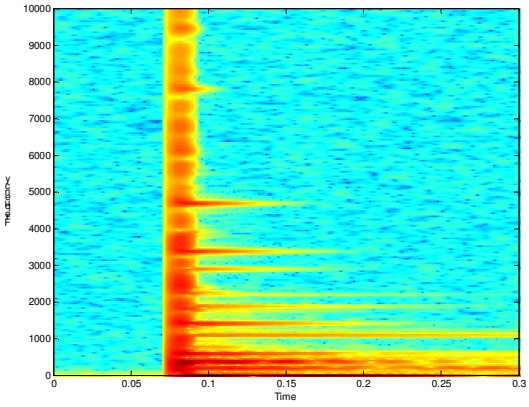
Annexe 2

Spectrogrammes de la vitesse du milieu de la poutre soumise à un choc pour deux niveaux d'intensité

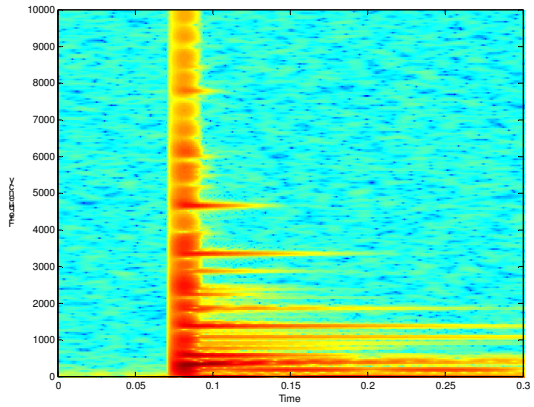
DOUX **FORT**

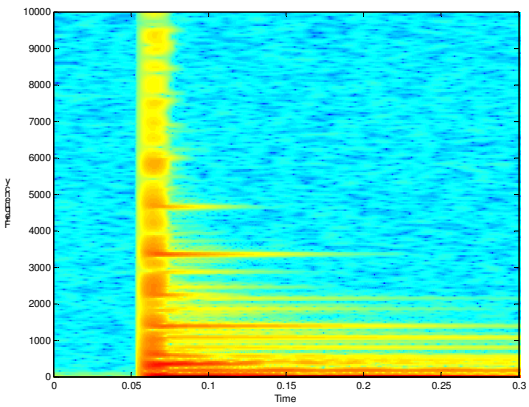
Charge 0



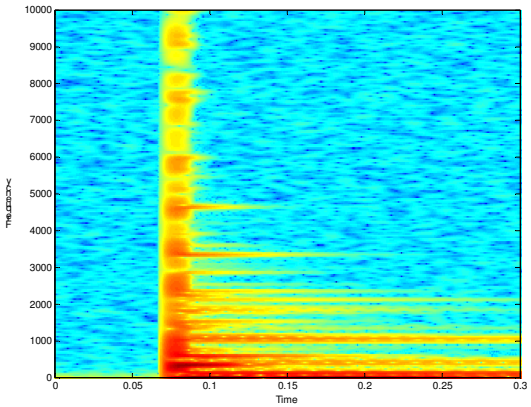


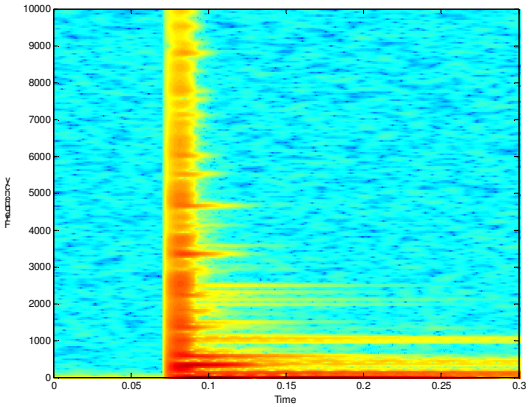
Charge 1



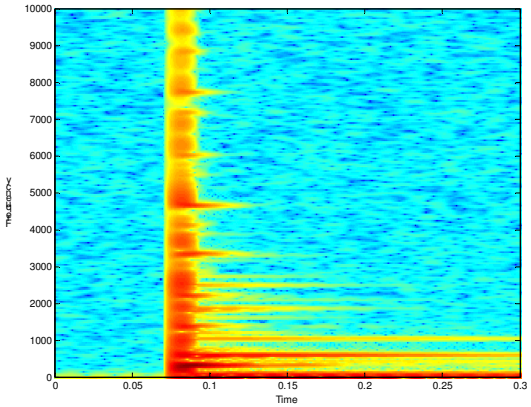


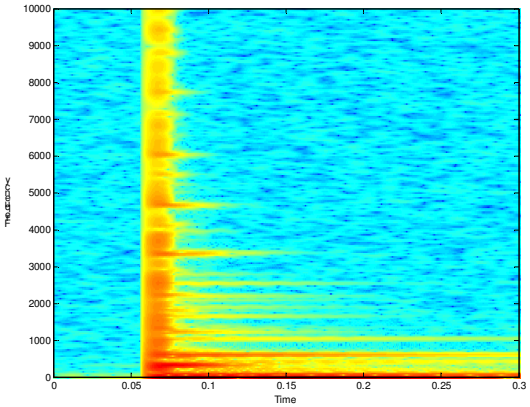
Charge 2



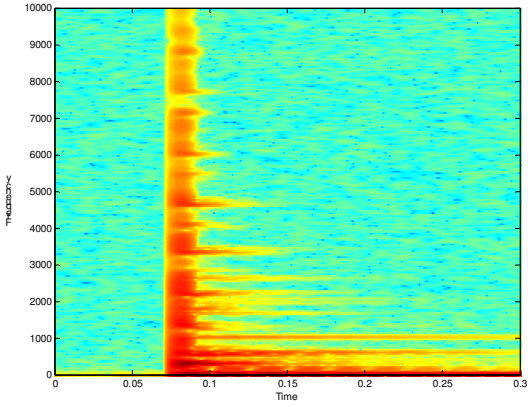


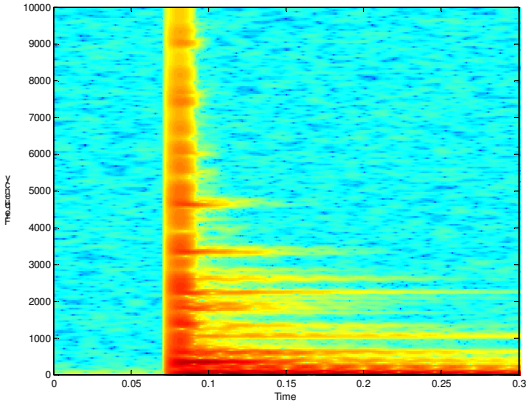
Charge 3



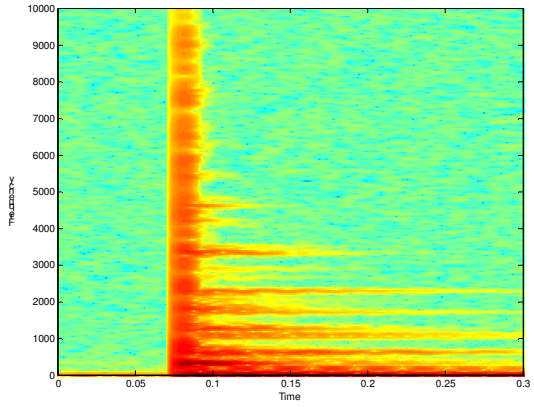


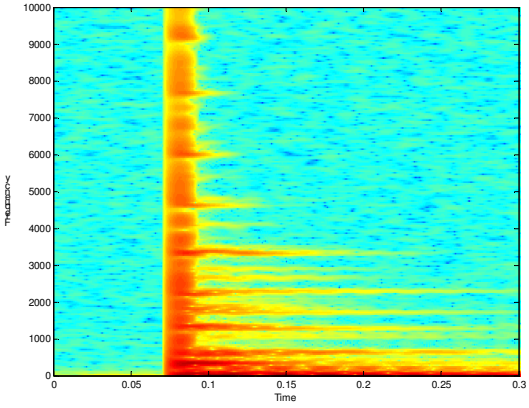
Charge 4



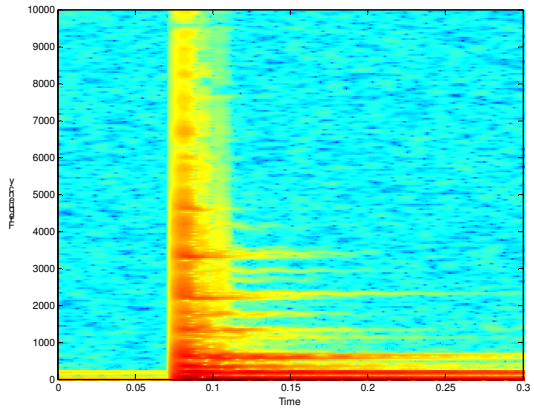


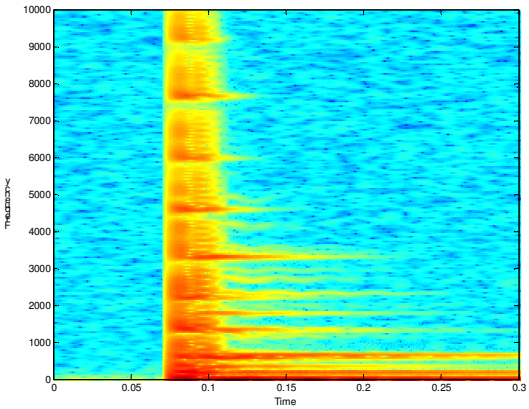
Charge 5



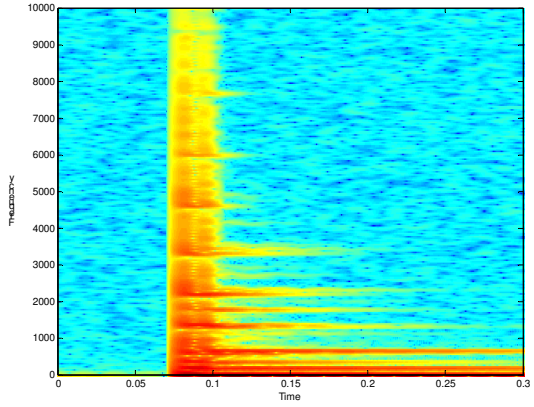


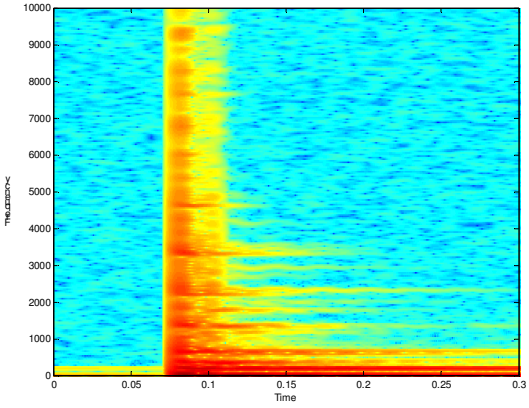
Charge 6





Charge 7



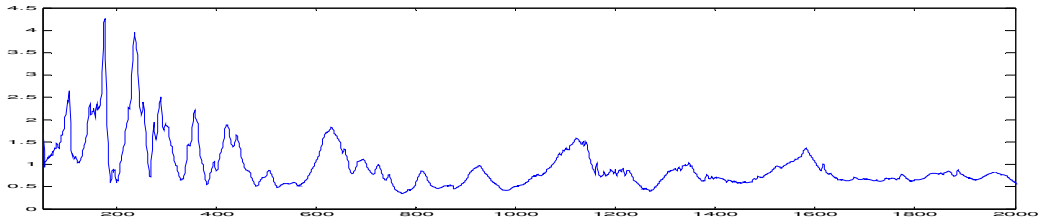


Annexe 3

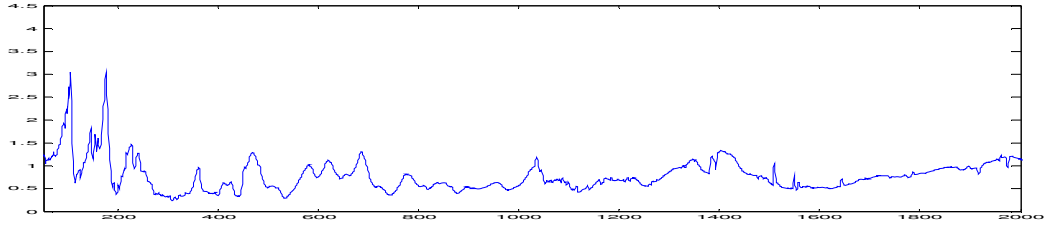
Mobilités du piano pour 3 charges

Charge 0

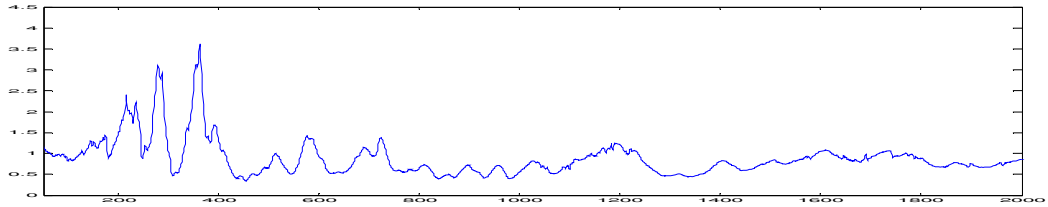
Position 1



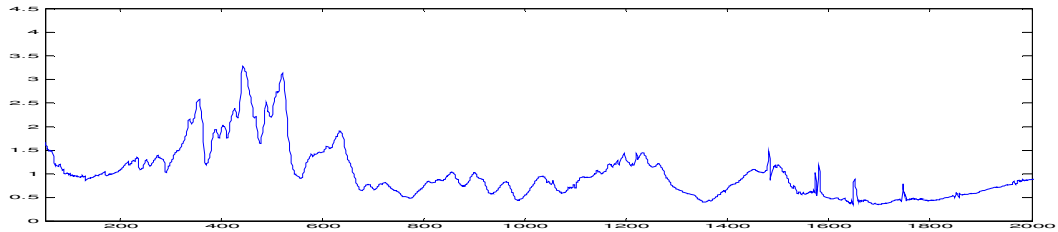
Position 2



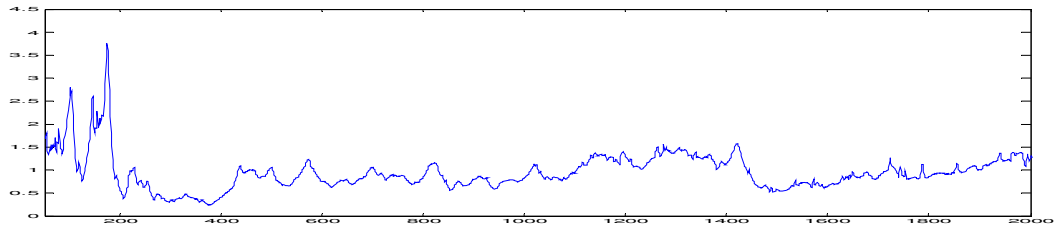
Position 3



Position 4

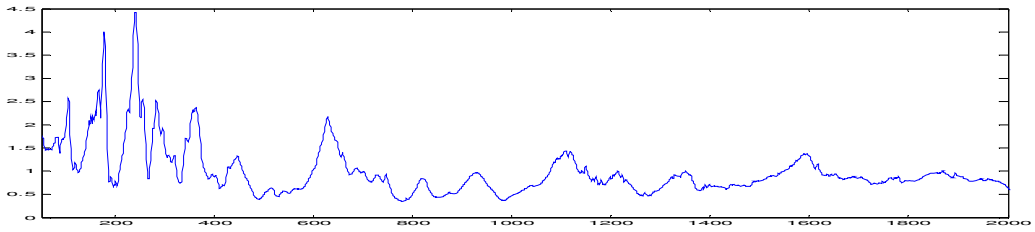


Position 5

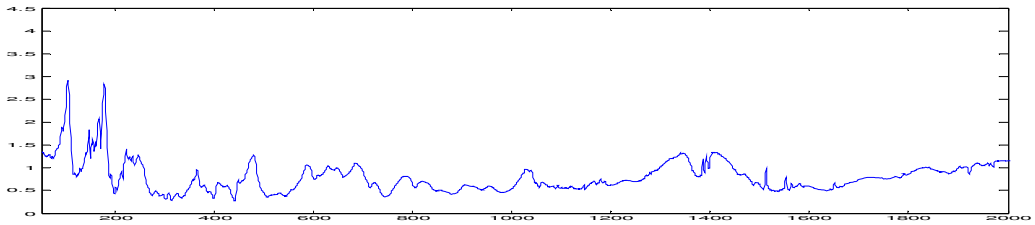


Charge 1

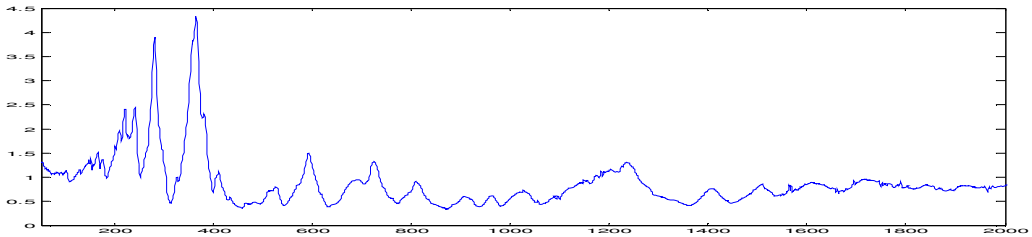
Position 1



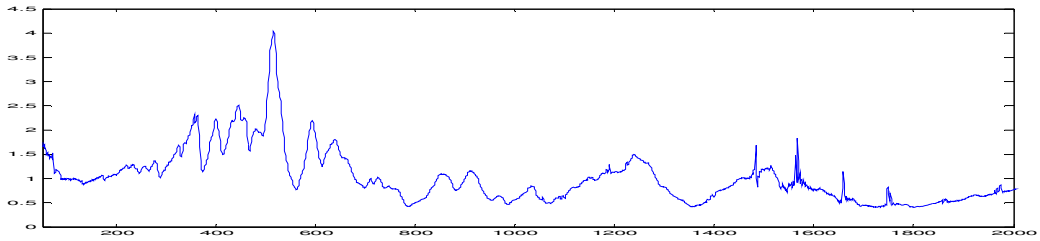
Position 2



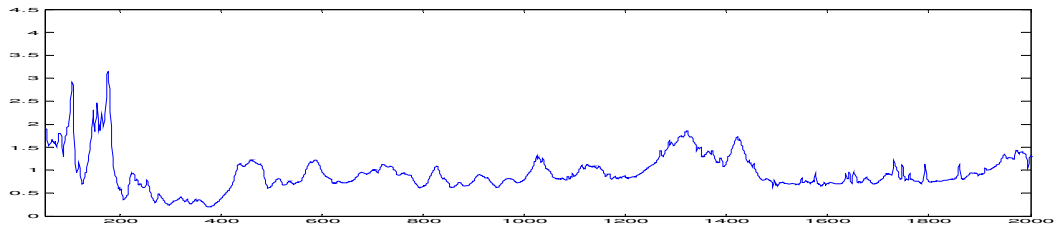
Position 3



Position 4

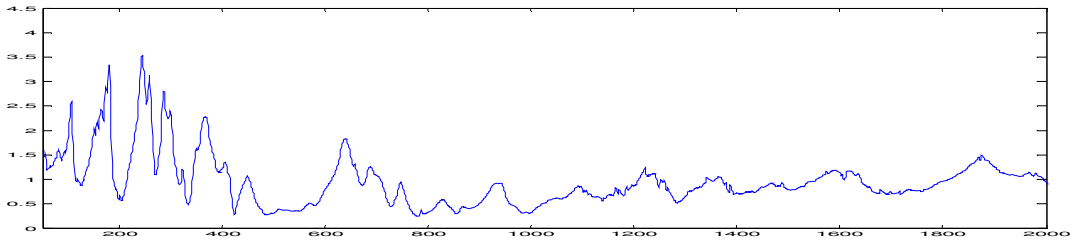


Position 5

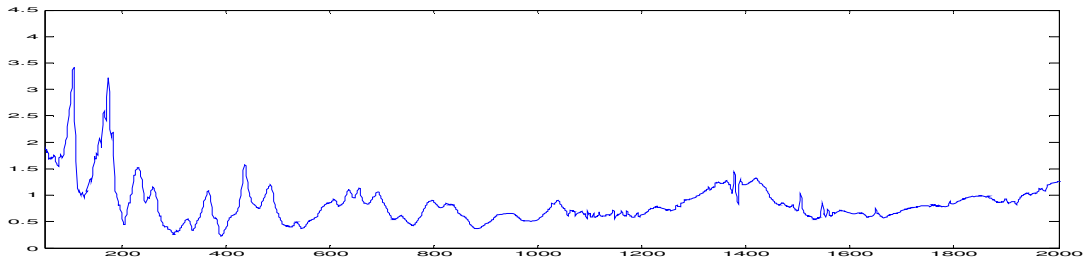


Charge 2

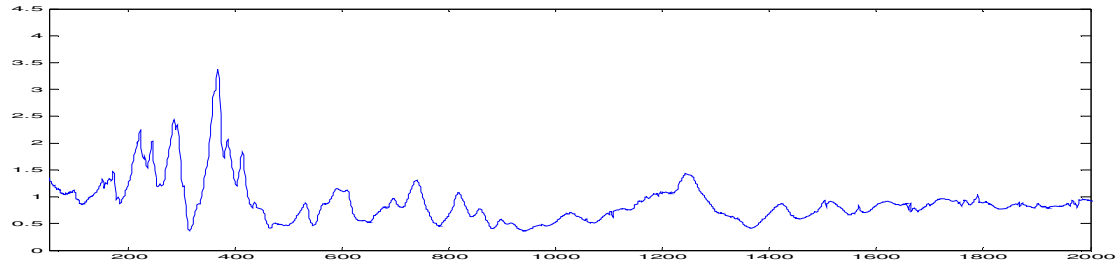
Position 1



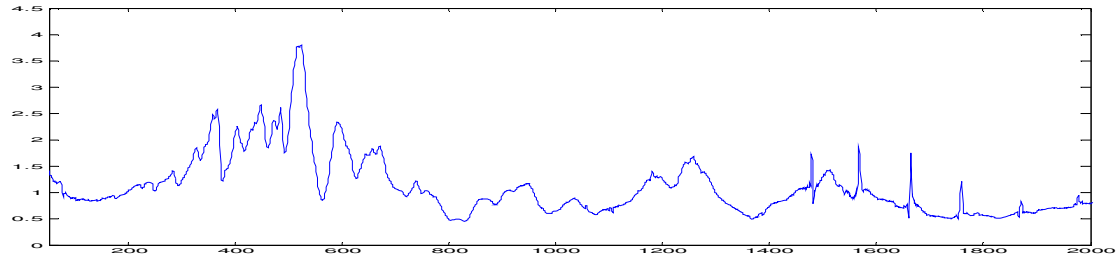
Position 2



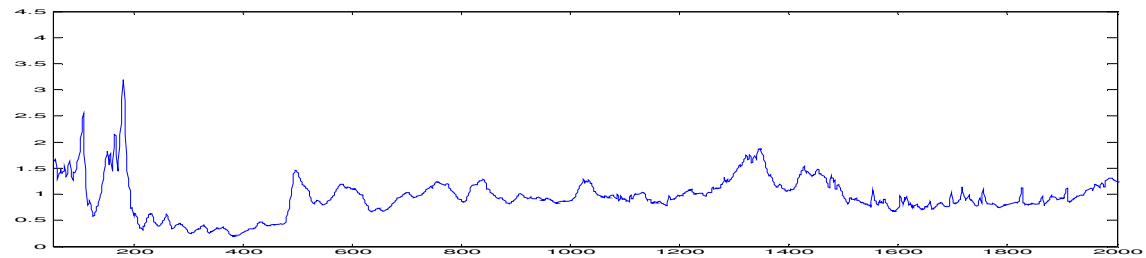
Position 3



Position 4



Position 5



Annexe 4

Consignes du test perceptif

Merci d'avoir accepté de participer à ce test.
Le but de ce test est d'acquérir des connaissances sur la qualité des pianos en général et de ce piano en particulier.
En effet, ce piano est expérimental, nous pouvons lui appliquer diverses modifications. Nous aimerions que vous évaluiez sa qualité dans sa configuration actuelle. Je vous rappelle que nous avons rendez-vous pour d'autres configurations.

1) Pour commencer, le mieux est que vous l'essayiez, comme vous le feriez pour tout nouveau piano. Je vous laisse vingt minutes pour faire tout ce que vous voulez pour l'évaluer, tout en me transmettant votre jugement à ce propos. Permettez moi de vous enregistrer.

2) Maintenant, je vous laisse environ quinze minutes pour exécuter les extraits musicaux que nous vous avons fournis. Après chaque extrait, je vous demande à nouveau d'évaluer les qualités qui vous paraissent prégnantes en réponse à ces différents morceaux.

3) Nous aimerions étudier la réponse de cet instrument à un crescendo d'accords. Pouvez vous en faire un dans le grave, un dans le médium et un dans l'aigu, en donnant vos impressions après chaque crescendo.

Un petit café pour décompresser?

Annexe 5

Extraits musicaux imposés aux pianistes

Chopin

- Etudes : Opus 25, numéros 1: les deux premières phrases : équilibre et chantant de l'instrument.
- Préludes : Numéro 6 p.7 . 5 premières mesures. Mélodie.

Debussy

- Suite bergamasque p.19 Passepied : staccato basse.
  p.14 Clair de Lune: 8 premières mesures.enrobé, velouté.
- Arabesque numéro 1. : arpèges, velouté. 8 premières mesures.

Schumann

- Scènes d'enfants : Rêveries p.8. 5 premières mesures :Chantant aigu/medium + polyphonie.
- Fugue numéro 2 p.6 (TB) 8 premières mesures : polyphonie
- Gesange der Fruhe 5 premières mesures.

Ravel

Miroir numéro 4 : thème dans le grave.

Liszt

12^{e} rapsodie hongroise p.4 : très aigu chantant.

Rachmaninov

Prélude : Opus 32, numéro 10 : puissance.