

**Antoine Liutkus**

---

Catégorisation d'un ensemble de données  
Etude de la charge de la table d'harmonie du piano

---

# Plan

---

## Introduction

### L'existant : Une banque de données de sons de piano

- Contexte : présentation de l'expérience
- Les enjeux de l'étude
- Mise en forme des données
- Présentation des descripteurs standards utilisés.
- Méthodes originales
  - Une nouvelle méthode d'extraction de pics
  - Des descripteurs pour les paramètres de la loi de distribution des signaux

### Démarche

- Conception d'un outil d'automatisation des calculs
- Implémentation des descripteurs
- Méthodes d'analyse des données
  - Introduction
  - De la structure de la base de données vers les descripteurs
    - Réduction des descripteurs à un sous ensemble de variables
    - One-Way ANOVA
    - Notation d'un descripteur : IRMFSP
  - Des descripteurs à une structure de base de données : catégorisation
    - Analyse en composantes principales
    - Regroupements par valeurs de descripteurs
  - Implémentation de ces méthodes d'analyse

### Résultats pour le piano

- Introduction
- Présentation des résultats
  - Descripteurs temporels
  - Descripteurs spectraux
  - Descripteurs harmoniques
- Discussion de certains aspects remarquables
  - Retour sur la validité de l'expérience : justesse du piano
  - Carte des coefficients de qualité des partiels : lien avec la corde vibrante
- Limites et réflexions sur l'application au piano
  - Nécessité d'une étude perceptive
  - Quelques idées pour améliorer l'étude de l'impact de la charge

### Application à d'autres études : collaborations

- La voix en environnement bruyant : Maëva
- Catégorisation de sons de synthèse d'une plaque de bois : [nom de la stagiaire]
- Détection de la distance de cassure d'un jet : Anne

### Conclusion

## **Annexes**

- Bibliographie
- Présentation du LAM
- Plan du dossier technique de la base de données

## Introduction

### **Le Laboratoire d'Acoustique musicale.**

Le laboratoire du CNRS qui m'a accueilli lors de ce stage, dont on trouvera la présentation complète en annexe, est un laboratoire dont les ambitions multiples ont toutes une problématique commune : parvenir à faire le lien entre la musique en tant qu'objet physique et la musique en tant qu'objet qui fait sens pour l'humain, que nous appellerons objet perceptif. Sa particularité, s'il est envisagé dans sa globalité, n'est pas à proprement parler une expertise dans un domaine scientifique particulier, ni même dans des études musicologiques, mais plutôt dans la synthèse rigoureuse des études scientifiques des phénomènes dans le but de mettre le doigt sur leur dimension musicales.

On trouve ainsi au LAM des chercheurs dont les spécialités sont aussi variées que le traitement du signal, l'acoustique ou encore les sciences humaines. La spécificité de ce laboratoire est ainsi une démarche très originale de mise en commun des compétences de chacun dans des projets de recherche communs, s'axant principalement autour de trois composantes majeures : les instruments de musique, les techniques audio et la perception/cognition.

On peut présenter ici brièvement la démarche scientifique couramment adoptée au laboratoire. Lorsqu'il s'agit d'étudier un phénomène musical, que ce soit un instrument de musique, une technique audio de traitement du son, l'étude de qualités musicales dans une voix, on se retrouve confronté à deux points de vue non trivialement associables : celui de l'objet physique et celui de l'objet perceptif.

Dans le but d'étudier le phénomène, on part ainsi des deux données à notre disposition en effectuant de front une analyse scientifique du problème posé et une analyse perceptive sous la forme de verbalisation libre ou orientée. Ce qui est spécifique au laboratoire, c'est sa démarche systématique de mise en relation des deux bouts de ce fil conducteur, souvent par un procédé itératif qui permettra au final de comprendre mieux si c'est possible quelles sont d'une part les causes matérielles mesurables de certains caractères subjectifs, mais également quelles sont les conséquences subjectives de la modification d'un certain nombre de paramètres contrôlables.

Cette démarche nécessite une forte rigueur dans le traitement car il est facile de perdre une dimension fondamentale du problème en analysant mal les verbalisations des sujets perceptifs et en restreignant le champ des études scientifiques à un certain nombre de paramètres connus qui nous sont chers.

C'est au sein d'une telle problématique que mon stage s'est situé. En arrivant au laboratoire, j'ai intégré un groupe de recherche axé sur l'étude d'un instrument de musique particulier : le piano. Les chercheurs impliqués dans ce projet sont tout autant des spécialistes en mécanique, en traitement du signal, mais aussi en acoustique et en sciences humaines. Divers thèmes secondaires sont abordés au sein de ce qui s'appelle « L'atelier piano », qui visent à aboutir à une étude de plus en plus complète des divers aspects de l'instrument.

Mon stage est le prolongement du stage de DEA d'Adrien Mamou-Mani, qui s'est appliqué à étudier la table d'harmonie du piano, en particulier sa charge, paramètre fondamental de facture de l'instrument. La charge de la table d'harmonie est la manière dont le corps vibrant de l'instrument (la table d'harmonie) est amarré à sa

structure. Il est de notoriété publique chez les facteurs d'instruments qu'il s'agit là d'une des données fondamentales à régler avec précision si on souhaite obtenir un instrument de qualité.

Sa démarche a consisté à mettre en évidence, par une étude mécanistique du problème, un certain nombre de phénomènes non linéaires entre la charge de la table d'harmonie et le son produit. Ce stage aboutit naturellement à une étude de la réciproque de ce phénomène dans un souci de rigueur et d'adéquation avec la démarche générique propre au laboratoire.

Ainsi, lors de son stage, Adrien a produit un certain nombre d'enregistrements correspondant au son que produit le piano en faisant varier un certain nombre de critères physiques (l'expérience sera présentée plus loin). Mon travail a alors consisté à partir de ces enregistrements et à voir en quoi il était possible de tirer des conclusions quant à l'influence de la charge sur le son du piano, en faisant cette fois totalement abstraction de l'étude mécanistique précédemment effectuée. C'est la comparaison entre les résultats des deux études qui devrait alors produire des conclusions quant à la validité de certaines hypothèses et l'étude d'un certain nombre d'autres dimensions de traitement, non explorées jusque là.

Il est intéressant de remarquer ici que cette démarche n'est pas une particularité de l'étude du piano, mais peut s'appliquer à un grand nombre d'autres cas, que ce soit l'étude de tout autre instrument ou l'étude de l'influence de paramètres de synthèse sur le son produit. Ainsi, ce stage fut l'occasion de développer pour le LAM des outils adaptés à ses recherches en cours : le piano, mais dont les spécifications en permettent l'utilisation dans un grand nombre de ses autres activités de recherche.

## **Cadre de l'étude : une banque de données de sons de piano**

### **Présentation de l'expérience**

Mon stage fut le prolongement d'une recherche entamée lors du stage de DEA d'Adrien Mamou-Mani portant sur l'étude des phénomènes non linéaires dans la table d'harmonie du piano. Afin d'étudier l'influence de la charge, il fut décidé d'enregistrer grâce à un couple de micros placé au dessus d'un piano à queue les sons produits par chacune des notes blanches de l'instrument, pour trois forces de frappe reproductibles et pour trois charges différentes de la table d'harmonie.

Obtenir une force de frappe reproductible fut un des premiers soucis de l'expérience et cela fut réalisé grâce à l'utilisation d'un électroaimant appliquant sur les touches blanches du piano une frappe calibrée.

La modification de la charge de la table d'harmonie est une tâche fastidieuse car elle implique l'intervention d'un spécialiste pour tout d'abord modifier la pression de la table sur la structure, mais aussi pour accorder à nouveau le piano en entier une fois cette opération effectuée. De fait, trois charges seulement furent étudiées pour un même piano.

Ainsi, l'expérience a abouti à la production de  $52 \times 3 \times 3 = 468$  sons de piano qu'il s'agissait d'étudier.

### **Enjeux de l'étude**

Tout d'abord, le premier enjeu naturel pour cette étude est de savoir si la modification de la charge de la table d'harmonie du piano s'entend ou pas. Il est en effet concevable que les répercussions de la modification d'un paramètre de facture de l'instrument soient si faibles que les différences soient inaudibles. Il s'agit d'étudier des phénomènes qui ont une réalité perceptive sur le plan musical, car c'est là la vocation du laboratoire.

En prolongement de cette étude préliminaire, il est intéressant d'étudier ce qui change réellement d'une charge à l'autre, dans le but de mieux orienter le travail de modélisation de l'autre côté de la chaîne de traitement, de confirmer ou d'infirmer des hypothèses faites, d'ouvrir de nouveaux champs de recherche. Cette étude de « ce qui change » correspond aussi bien à une étude perceptive : l'étude des réactions d'auditeurs à ces sons de piano, qu'à l'étude par des techniques audio du type traitement du signal

### **Mise en forme des données**

Le premier travail a consisté à mettre en forme ces données afin de pouvoir les exploiter. Elles se présentaient sous la forme de longs enregistrements qu'il a fallu segmenter à la main.

Une étude bibliographique [1] a conduit à l'établissement d'un certain nombre de descripteurs audio standard à appliquer aux signaux. Il s'agit de descripteurs inclus dans la norme MPEG-7.

## Démarche

---

### Un outil d'automatisation des calculs

Dans le souci de s'affranchir pour le reste du stage des difficultés techniques importantes liées à l'étude d'une banque conséquente de données, j'ai mis au point un outil dont la première vocation a été de permettre l'automatisation des calculs sur l'ensemble des données. On trouvera en annexe une présentation de cet outil, sous la forme d'un manuel complet.

Au fur et à mesure de l'avancement dans le projet, cet outil s'est complexifié pour prendre en considération un certain nombre de besoins rencontrés dans le cadre de l'étude des sons de piano, mais potentiellement valable dans le cadre d'autres études similaires. En particulier, on y trouve des besoins relatifs à l'étude statistique des données, la catégorisation, etc.

### Implémentation des descripteurs standards

Dans son article [1], Geoffroy Peeters présente une quarantaine de descripteurs classiques utilisés en traitement du signal. Qu'ils soient temporels, spectraux, harmoniques, ils furent implémentés tels quels dans notre étude, puis appliqués à l'ensemble des sons de la base de données.

Furent ainsi implémentés et calculés les descripteurs suivants :

- Enveloppe énergétique
- FFT
- Temps d'attaque, de redescende
- Centre de gravité temporel
- Autocorrélation
- Taux de passage à zéro
- Energie totale, harmonique, bruit
- Centre de gravité spectrale, variance spectrale
- Kurtosis spectral, temporel
- Pente spectrale
- Décroissance spectrale
- Fréquence fondamentale
- Inharmonicité
- Platitude spectrale

On pourra se référer à l'article de Peeters pour plus de détails sur ces descripteurs.

Les descripteurs étudiant la structure harmoniques du son partent dans le papier de Peeters du postulat des fréquences des partiels, considérées comme connues. La méthode d'extraction choisie lors de mon étude étant originale, je la présenterai dans la section suivante, dédiées aux méthodes originales mises en places.

## Mise au point de méthodes originales

- Loi de distribution des signaux

Au cours de l'étude est apparue l'hypothèse que la charge pourrait dans une certaine mesure agir sur la loi de distribution des signaux sonores, comme le fait l'effet audio de compression. Furent ainsi implémentés des descripteurs extrayant des sons certains paramètres de la loi des signaux, envisagés comme des variables aléatoires. On trouvera parmi eux :

- Histogramme de la répartition des échantillons en fonction du niveau
- Moments d'ordre 1, 2, 3 et 4 de cette répartition

- Extraction de pics

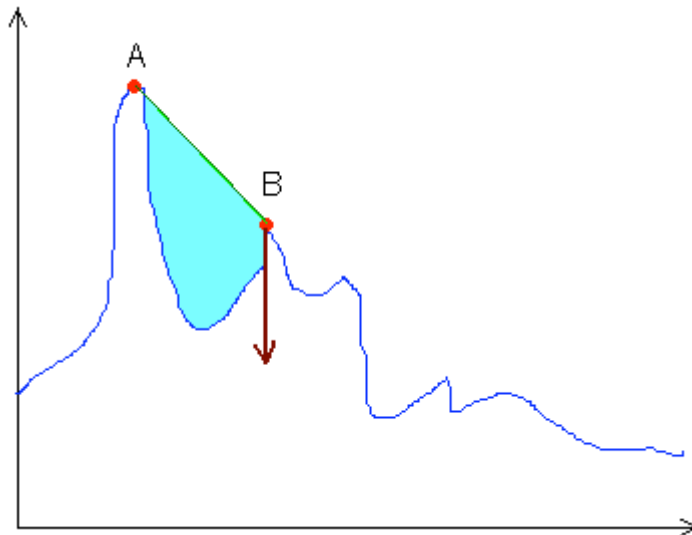
A divers étapes de l'étude, je fus confronté au problème d'extraction de pics d'un signal, et plus particulièrement au problème plus général de regroupement de points dans une courbe (les pics étant alors les points de valeur maximale de chaque regroupement).

Les méthodes utilisées couramment, en particulier la méthode d'extraction de pics par moyenne adaptative, fonctionnaient assez mal d'une manière générale et s'avèrent en tout cas fortement dépendantes des paramètres de seuils donnés. Dans le cas du piano, la situation est extrême : cet instrument possède en effet la particularité d'avoir une tessiture très étendue, ce qui rend l'extraction de partiels une tâche assez délicate à automatiser à partir du spectre du son.

La méthode développée dans le cadre du stage est basée sur un raisonnement par récurrence qui aboutit au regroupement par ensembles de tous les points de la courbe. Pour obtenir les pics, il suffit de prendre le maximum de chaque ensemble.

L'idée de base de cet algorithme est d'effectuer des regroupements des points les uns avec les autres en regroupant ensemble les points qui « tirent » le moins les uns sur les autres. Pour illustrer mon propos, je vais présenter la méthode avec une figure simple :





En disant qu'un point B tire sur un point A, je fais une analogie avec la mécanique en plaçant virtuellement entre A et B un bras de levier et en plaçant en B un poids égal au poids qu'aurait la matière accrochée au bras de levier, ici en bleu clair. Le paramètre important étant alors le moment de la force exercée sur A par B, que nous appellerons  $M(B \Rightarrow A)$ . S'il est trop fort, le point B casse le lien avec A et n'appartient pas au même groupe que lui, sinon il appartient au même groupe.

Considérons une courbe, qui est un vecteur de longueur N de scalaires.

Considérons un vecteur de longueur N dont chaque point est le groupe associé au point correspondant de la courbe.

Au début de l'exécution de l'algorithme. Associons le groupe 0 à tous les points, et marquons les tous comme non traités.

A un point quelconque de l'exécution de l'algorithme, considérons le point P de valeur maximale parmi les points marqués comme non traités.

Calculons le moment  $M(P \Rightarrow x)$  de la force exercée par P sur tous les points x marqués comme déjà traités.

Considérons M, le plus petit de ces moments et Xproche le point sur lequel P applique ce moment M.

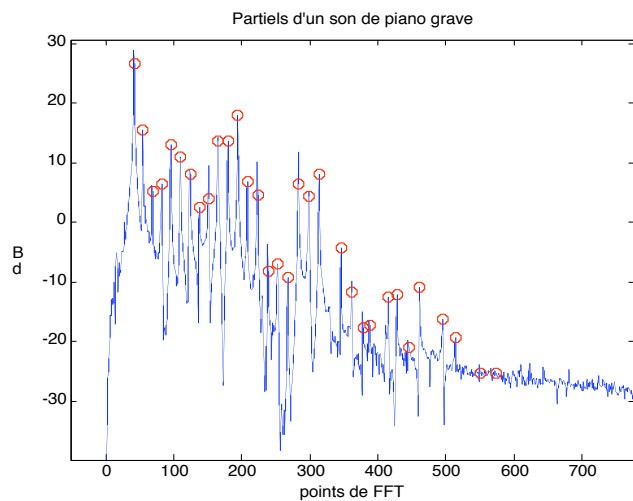
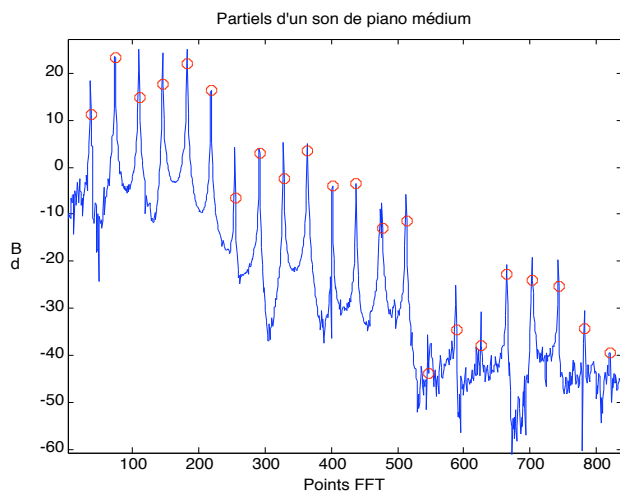
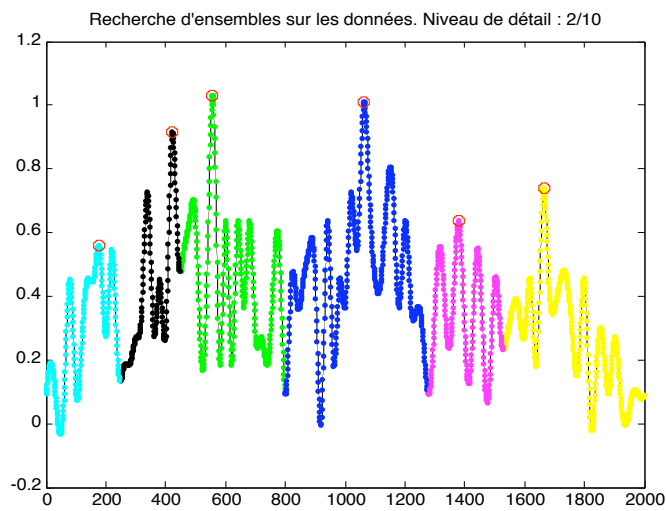
Si M est inférieur à une valeur seuil Mseuil, cela signifie que P tire peu sur le point Xproche. On associe alors à P le groupe de Xproche et on marque P comme traité.

Si M est supérieur à Mseuil, cela signifie que le point P tire trop sur Xproche, qui est pourtant le point sur lequel il tire le moins. En conséquence, on associe P à un nouveau groupe et on le marque comme traité.

Dans tous les cas, le processus est alors à itérer et au bout de N itérations, on aura associé à chacun des points de la courbe un numéro de groupe et ainsi effectué la détection de pics.

L'intérêt fondamental de cette méthode est de procéder avec une approche d'ensemble plutôt qu'une approche locale à abscisses croissantes. On conçoit en effet que c'est la visualisation de l'ensemble d'une courbe qui nous permet de distinguer entre les pics parasites et les pics principaux, pour un niveau de détails souhaité. Afin de rendre intuitive l'utilisation de la méthode, j'ai appelé « Niveau de détail » le paramètre de seuil, allant de 0 à 10, et converti automatiquement en moment seuil pour les calculs.

Cette méthode fonctionne très bien et on trouvera ci-dessous un certain nombre d'applications au cas de regroupement de points dans un histogramme (faible niveau de détails), à la détection de partiels pour une note médiane du piano (niveau de détails médian) et dans le cas d'une note grave de piano (niveau de détails fort).



Un algorithme spécifique estime le niveau de détail nécessaire avant d'envoyer le spectre à l'algorithme. C'est en cela qu'il y a estimation d'un seuil, mais ce seuil se retrouve fortement simplifié, dans la mesure où un seul paramètre est suffisant pour la méthode.

## **Méthodes d'analyse des données**

- Introduction

Une fois les descripteurs calculés pour l'ensemble des sons, il s'agissait de procéder à une étude sur ces données afin d'en tirer des conclusions quant à l'influence des divers paramètres de production des sons : hauteur, vitesse et charge. D'une manière générale, il se dégage de cette problématique qu'une certaine rigueur est de mise dès qu'il s'agit d'études statistiques, dans la mesure où il est facile de tirer des conclusions hasardeuses dès lors que la population des données est suffisamment réduite.

Les traitements effectués sur les données au cours de ce stage peuvent se regrouper en deux catégories.

Dans le premier cas, on part de la structure de la base de données et on connaît donc *à priori* les paramètres que les descripteurs sont censés plus ou moins bien représenter (changement de hauteur, de vitesse et de charge ici) et on cherche à établir pour chacun de ces paramètres quels sont les descripteurs les plus appropriés pour le représenter.

La deuxième catégorie de traitement des données adopte une attitude résolument « catégorisante » dans le sens où elle place initialement toutes les données au même niveau puis cherche à les regrouper par similitudes des valeurs des descripteurs. De telles méthodes sont censées aboutir à une classification des données sous forme de familles et la question posée par notre problème est précisément la suivante : retrouve-t-on par le biais de ces méthodes automatisées une influence de la charge ?

- De la structure de la base vers le descripteur

Dans ce cas d'études statistiques, nous connaissons la structure de la base de données, ce qui signifie que pour chaque son, nous savons quelle est sa vitesse, sa hauteur et la charge du piano. Dans ces conditions, ce qui nous intéresse est de savoir pour chaque descripteur dans quelle mesure sa valeur est représentative de chacune de ces données. Il existe des outils statistiques permettant de mesurer la valeur discriminante d'un descripteur pour une certaine partition d'une population. C'est exactement le cas d'application recherché ici : on cherche à étudier à quel point un descripteur va permettre par exemple de déterminer la charge des sons de piano. Il s'agit d'une partition de l'ensemble des sons car à chaque son est associée une seule charge.

Trois outils furent implémentés qui effectuent ces opérations et on pourra se référer au mode d'emploi fourni en annexe pour plus de détails. Il s'agit de :

- **La réduction d'un descripteur à un sous ensemble de variables** : dans notre étude, un son dépend de trois données charge C, hauteur H et vélocité V. Un descripteur d associé à ce son est par conséquent une fonction de trois variables :  $(C,H,V) \rightarrow d(C,H,V)$ . Cette méthode consiste à étudier l'erreur si on le considère comme fonction de moins de variables, par exemple  $d(C,V)$ .
- **One-Way ANOVA** : Cette méthode classique permet de visualiser la valeur d'un descripteur de façon graphique entre plusieurs lots de données, regroupés initialement entre elles. Par exemple, on peut dans notre cas effectuer un regroupement entre tous les sons de chaque charge et procéder à une étude pour chacun des descripteurs.
- **Notation d'un descripteur : IRMFSP**. (Inertia Ratio Maximization with Feature Space Projection) [2]. Cet algorithme attribue à un descripteur un scalaire entre 0 et 1 lié à son pouvoir discriminant sur une certaine partition de l'ensemble des données. On pourra se référer à l'article sus-cité pour plus de détails.
- Du descripteur vers la structure de la base

Dans ce scénario, ce qui est recherché est l'établissement d'une structure à partir des données seules. Il s'agit de regrouper entre eux les éléments ayant des valeurs de descripteurs semblables dans le but de former des familles. Deux approches furent tentées au cours du stage pour effectuer ce travail de catégorisation

- **Analyse en Composantes Principales** : Supposons que l'on ait N éléments à notre base, pour lesquels on a calculé P descripteurs. On trouvera une littérature abondante sur cette analyse, introduite en 1901 par Pearson et développée en 1933 par Hotelling, dont le principe est ni plus ni moins de trouver une base plus adaptée de l'espace  $R^N$  et d'ainsi trouver selon quels axes principaux s'articulent les données.
- **Regroupements par valeurs similaires de descripteurs** : Une approche tentée dans le cadre du stage fut de considérer pour chaque descripteur l'histogramme du nombre d'éléments par tranche de valeurs et d'appliquer à cet histogramme l'algorithme de décomposition en groupes, afin que chaque descripteur corresponde à une partition de l'ensemble des données. On peut ensuite par exemple regrouper entre eux les éléments qui ont le plus d'éléments en commun.
- Implémentation des méthodes d'analyse des données

L'ensemble des méthodes d'analyse des données présentées plus haut furent implémentées dans l'outil de base de données pour la catégorisation, présenté plus avant en annexe.

L'intérêt de compiler en cet outil toutes ces méthodes est leur réutilisabilité. Comme cela a été souligné précédemment, les besoins d'analyses de ce genre étant un problème si ce n'est classique, en tout cas récurrent au sein du laboratoire, disposer une fois pour toutes d'un outil permettant d'effectuer tous ces calculs est un gain de temps important pour la recherche. Les résultats sont consignés dans la section suivante.

## Résultats pour le piano

---

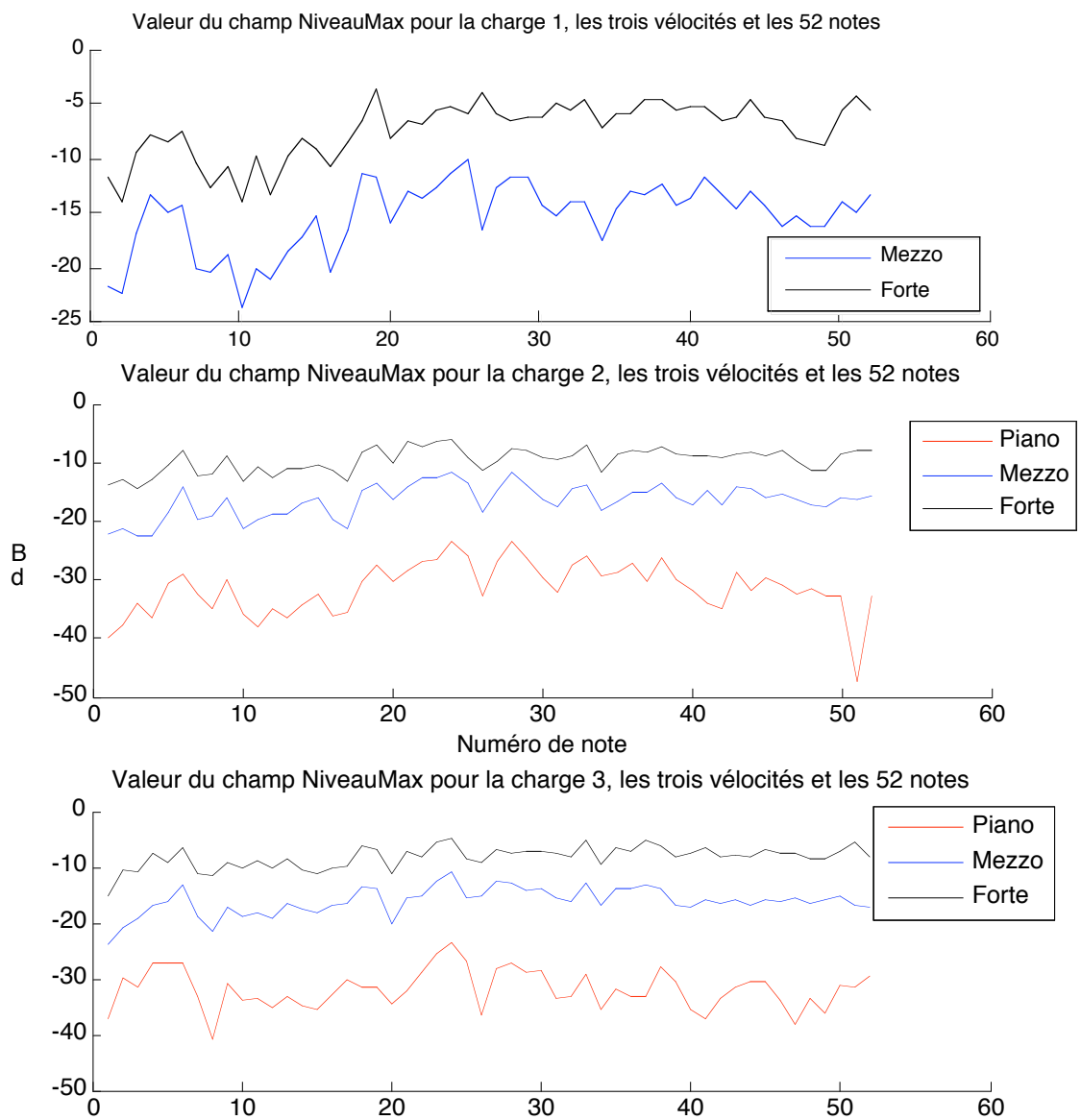
### Introduction

Dans cette section sont consignés les résultats des analyses effectuées sur les sons de piano. On y trouvera les différentes courbes des valeurs des descripteurs, présentées de diverses façon.

Pour un son donné d'une note de piano, on peut extraire un nombre infini de descripteurs et comme il a été dit plus haut, ce sont les descripteurs standards MPEG-7 qui furent choisis, ainsi qu'un certain nombre de descripteurs plus originaux. Les premiers sont systématiquement des scalaires : à un fichier, on associe un scalaire. D'autres peuvent être des vecteurs. Par exemple, à un fichier, on peut associer son spectre, sa courbe d'énergie en fonction du temps, etc. Le résultat est un vecteur. Un grand nombre de descripteurs sont ainsi des vecteurs. Dans tous les cas, ce ne sont pas les mêmes affichages qui sont adaptés dans les différents cas. Les courbes furent générées à partir de l'outil d'étude dont on trouvera en annexe un mode d'emploi.

## Présentation générale des résultats

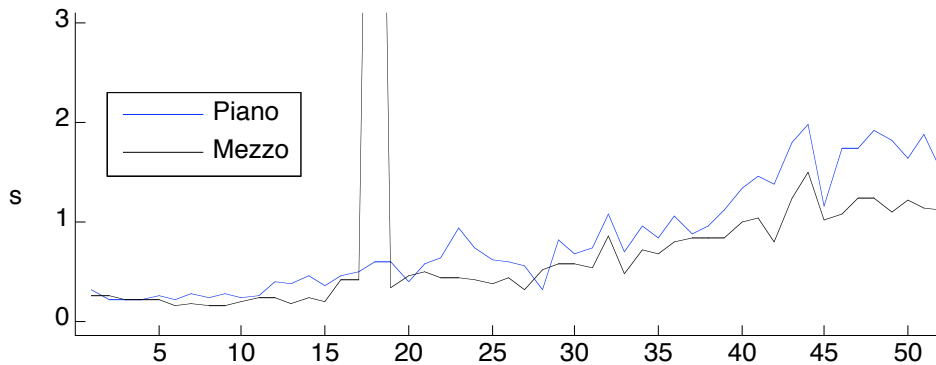
**Niveau maximal :** Niveau maximal en dB atteint par la note



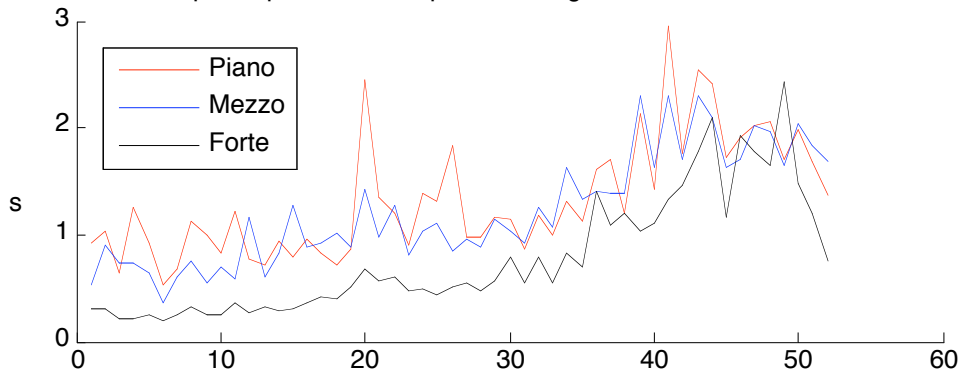
Il semblerait qu'une charge faible provoque une plus grande dynamique.

## Temporal Centroid

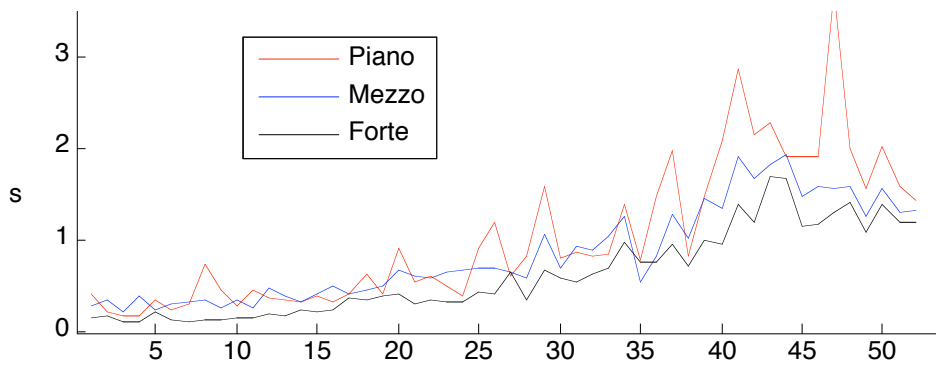
Valeur du champ TemporalCentroid pour la charge 1, les trois vélocités et les 52 notes



Valeur du champ TemporalCentroid pour la charge 2, les trois vélocités et les 52 notes



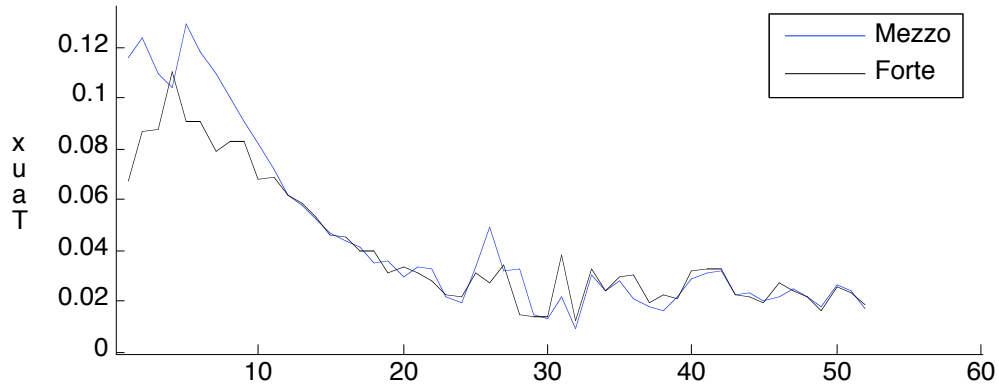
Valeur du champ TemporalCentroid pour la charge 3, les trois vélocités et les 52 notes



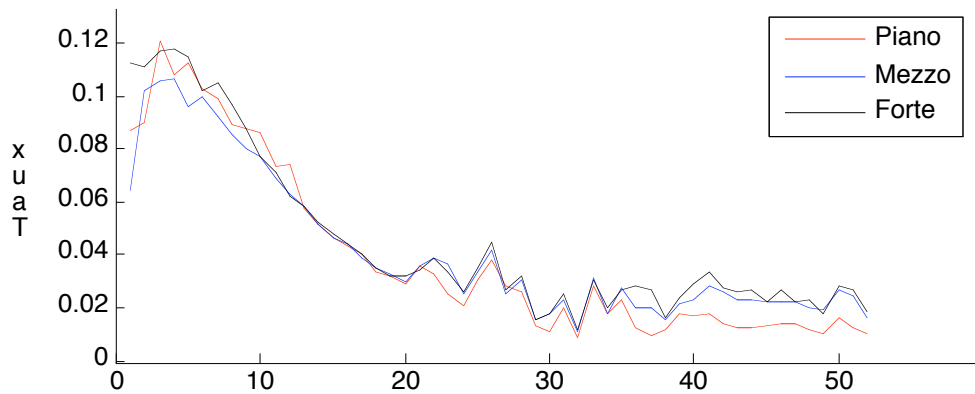
Il semblerait que la charge intermédiaire (dite « optimale ») provoque des valeurs plus grandes de centroïdes temporels pour les notes aigues.

## Taux de passage à zéro

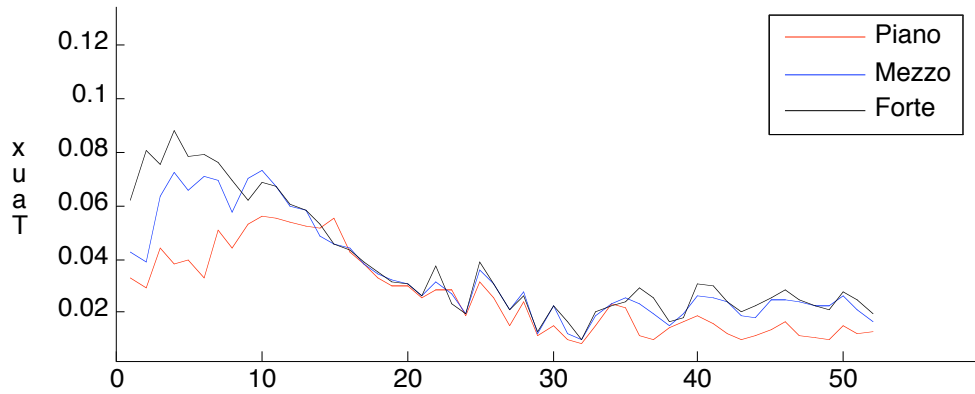
Valeur du champ ZeroCrossing pour la charge 1, les trois vélocités et les 52 notes



Valeur du champ ZeroCrossing pour la charge 2, les trois vélocités et les 52 notes



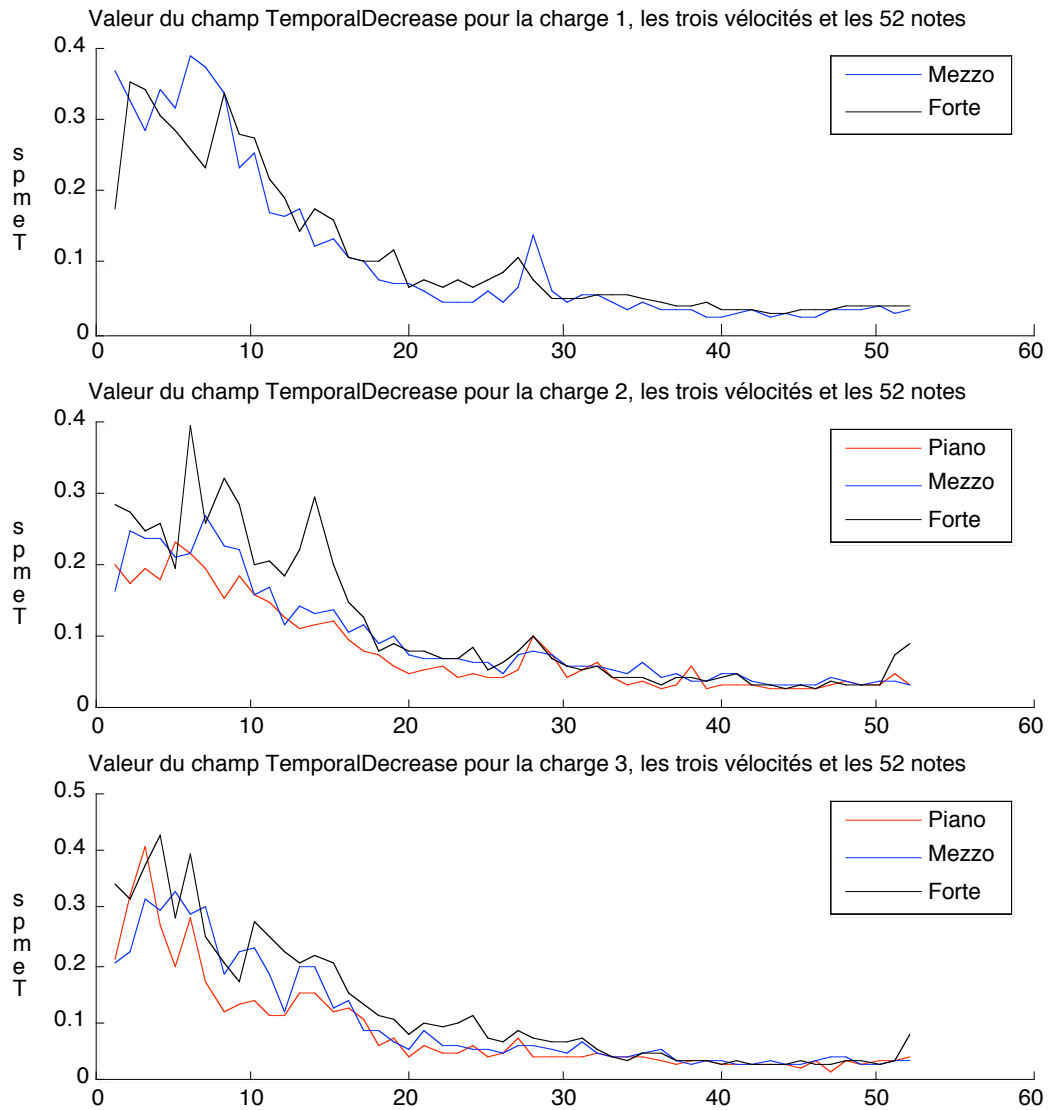
Valeur du champ ZeroCrossing pour la charge 3, les trois vélocités et les 52 notes



Le taux de passage à zéro semble décroître avec l'augmentation de la charge

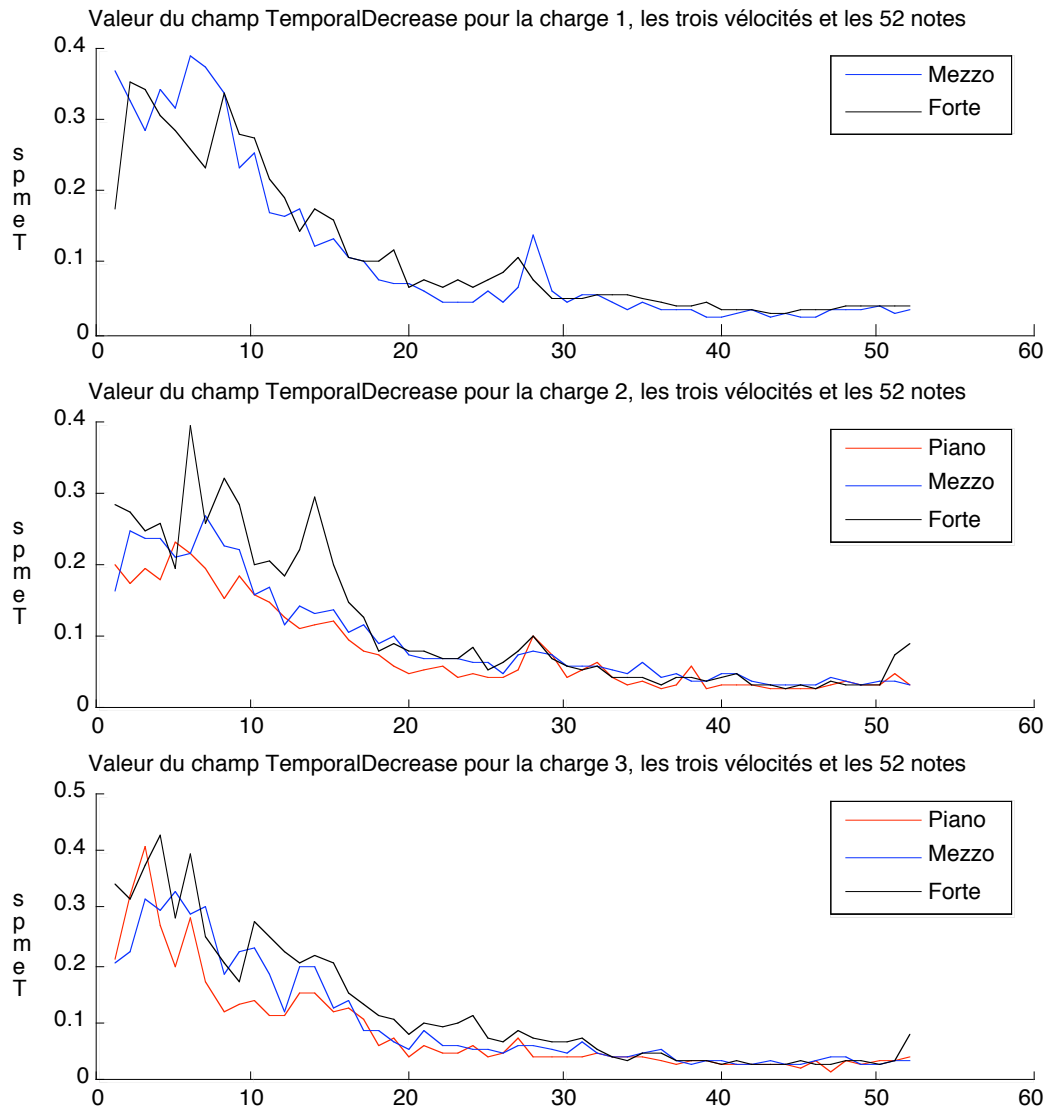


## Décroissance temporelle



La décroissance temporelle de l'énergie semble peu dépendre de la charge.

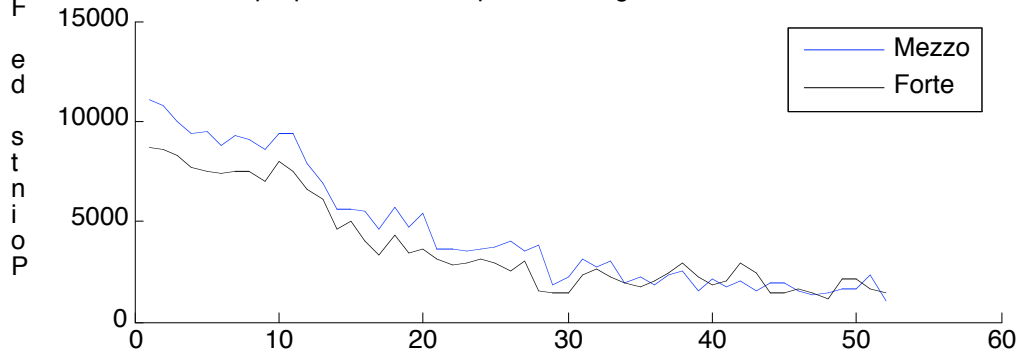
## Décroissance temporelle



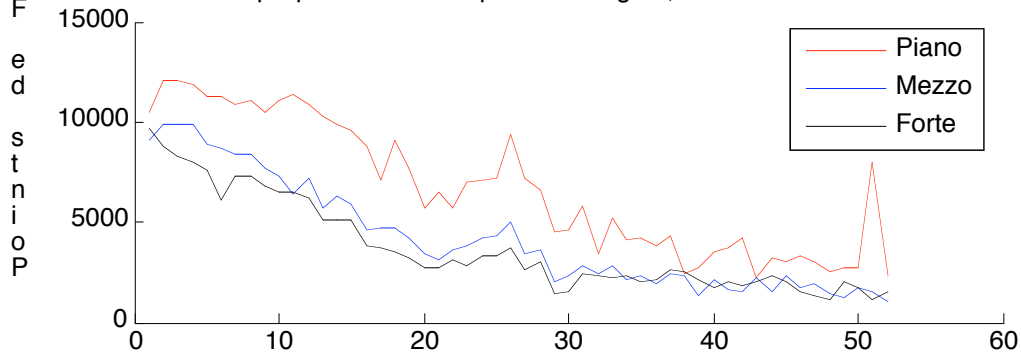
La décroissance temporelle de l'énergie semble peu dépendre de la charge.

## Centre de gravité spectral

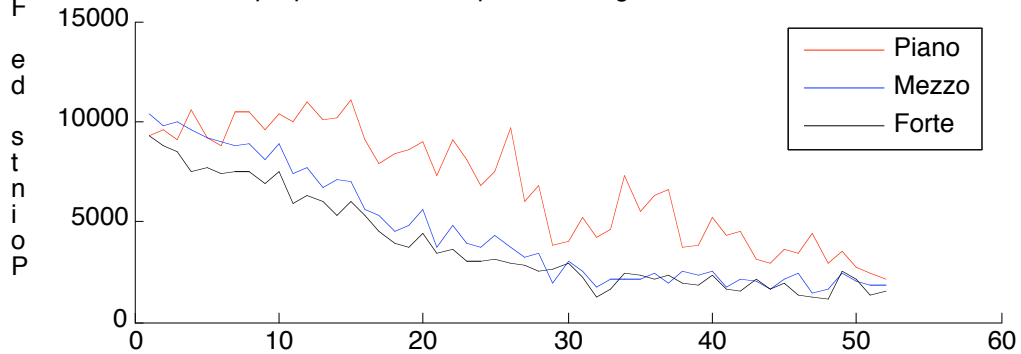
Valeur du champ SpectralCentroid pour la charge 1, les trois vélocités et les 52 notes



Valeur du champ SpectralCentroid pour la charge 2, les trois vélocités et les 52 notes

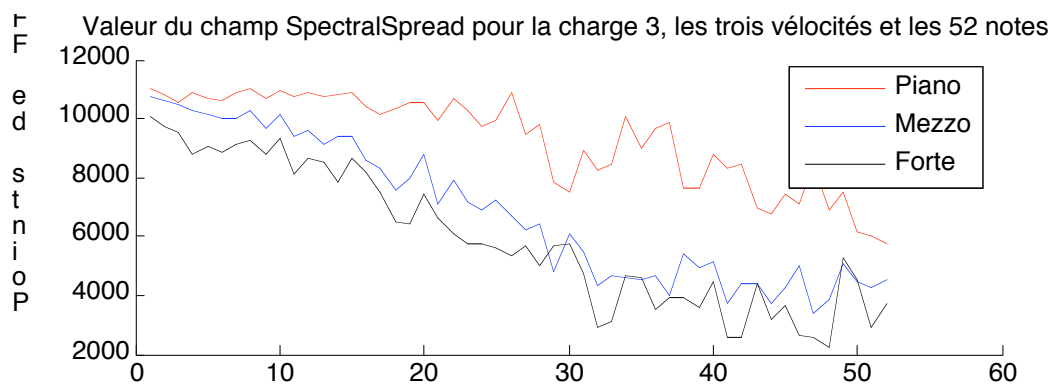
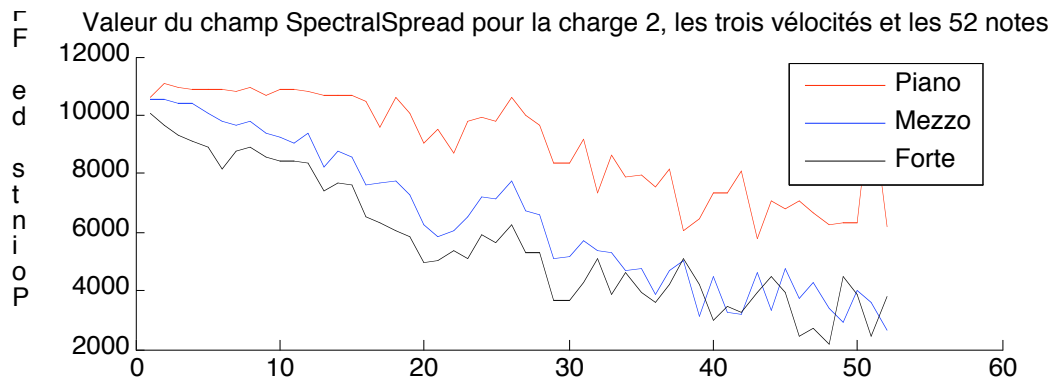
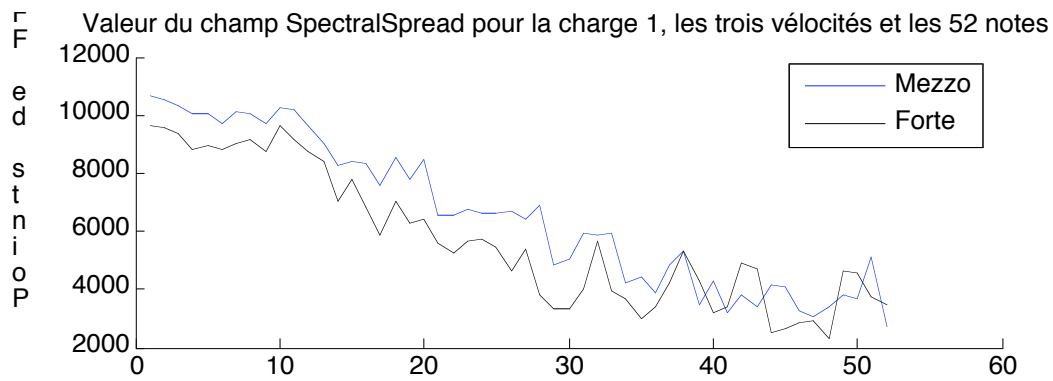


Valeur du champ SpectralCentroid pour la charge 3, les trois vélocités et les 52 notes



La position du centre de gravité spectral semble peu dépendre de la charge.

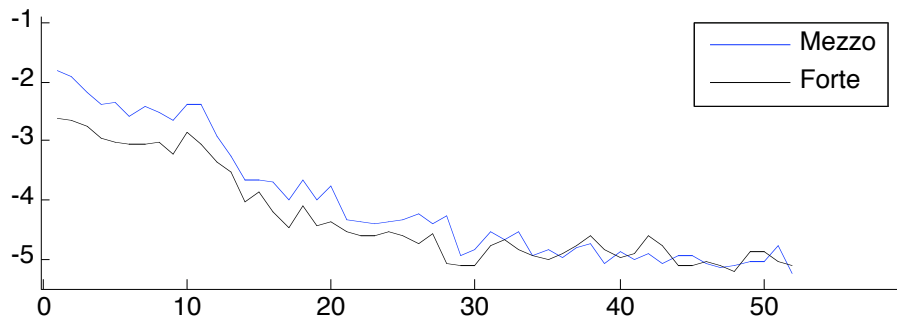
## Moment spectral d'ordre 2



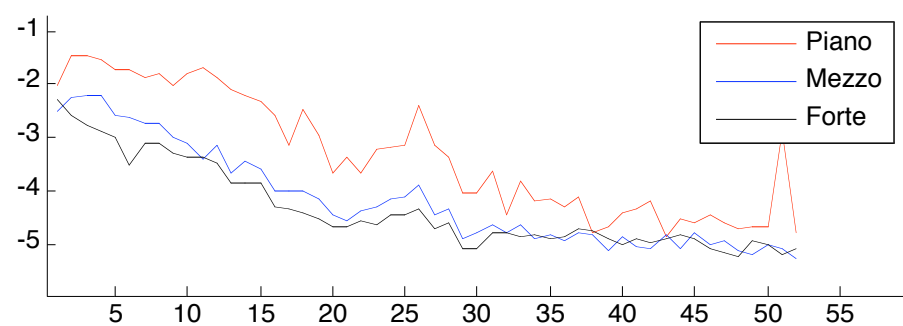
Le moment spectral d'ordre 2 semble peu dépendre de la charge.

## Pente spectrale

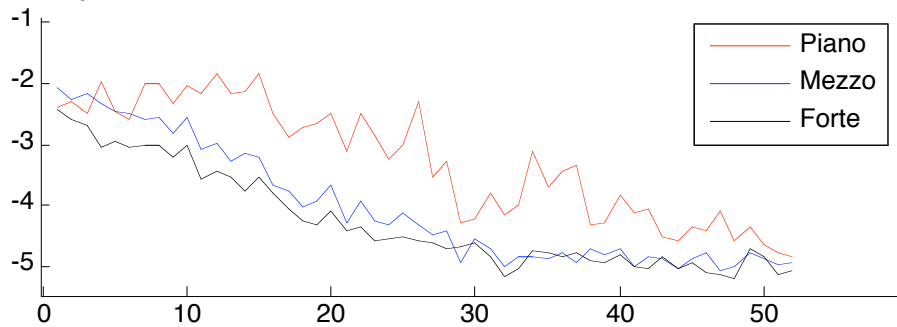
Valeur du champ SpectralSlope pour la charge 1, les trois vélocités et les 52 notes



Valeur du champ SpectralSlope pour la charge 2, les trois vélocités et les 52 notes

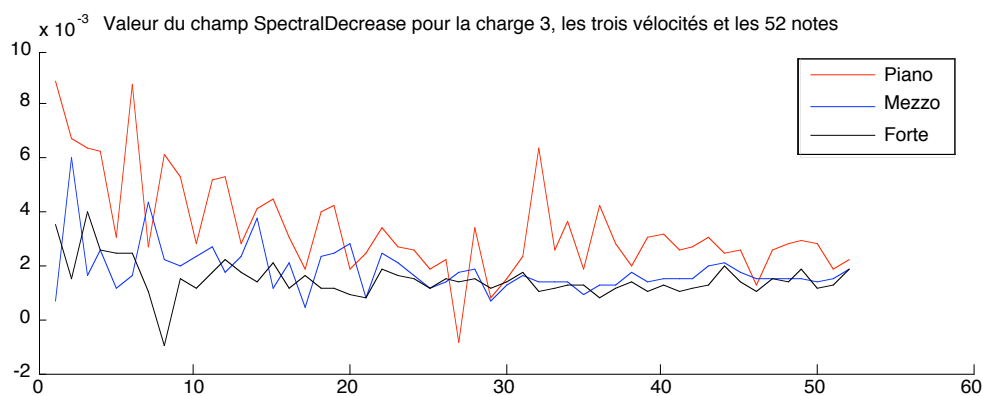
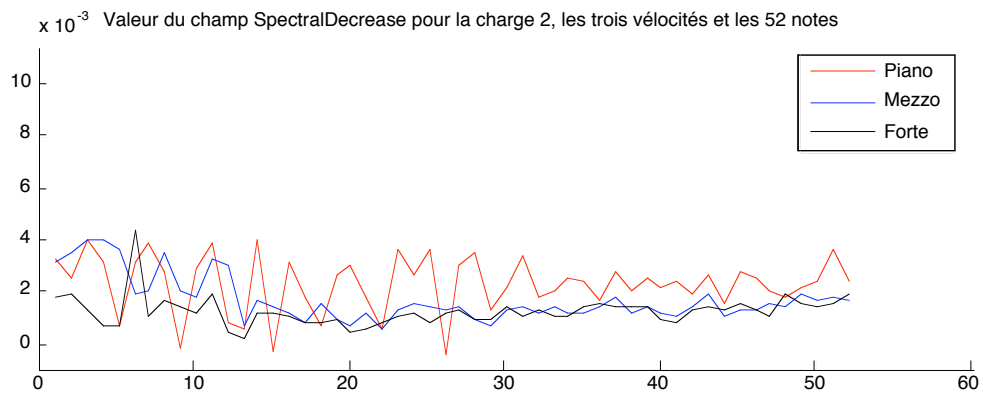
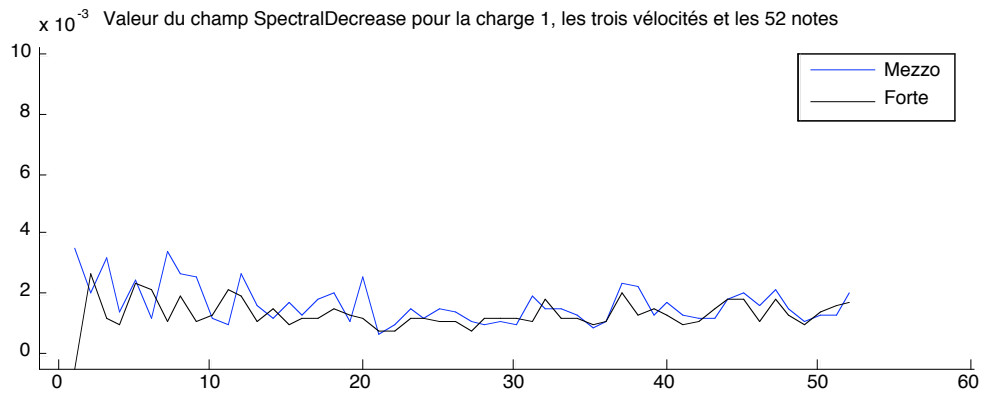


Valeur du champ SpectralSlope pour la charge 3, les trois vélocités et les 52 notes



La pente spectrale semble dépendre peu de la charge.

## Décroissance spectrale



On peut peut-être noter qu'une forte charge provoque une décroissance spectrale forte des sons piano.

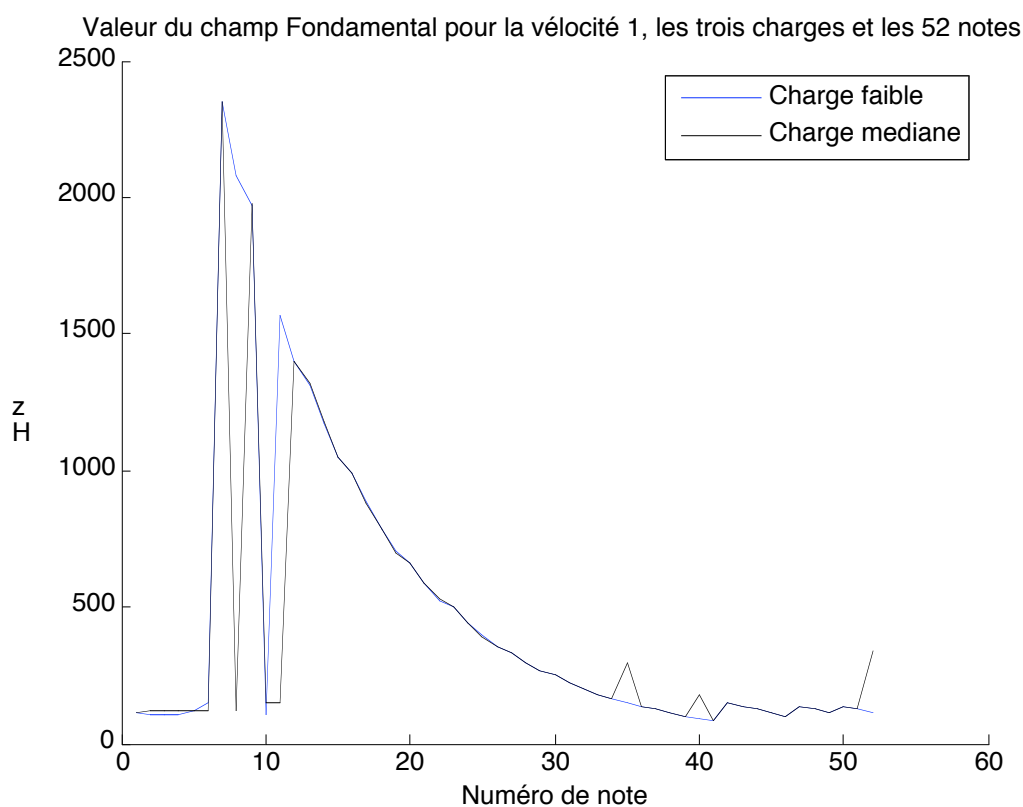
[RESULTATS NON ENCORE TOUS DISPONIBLES]

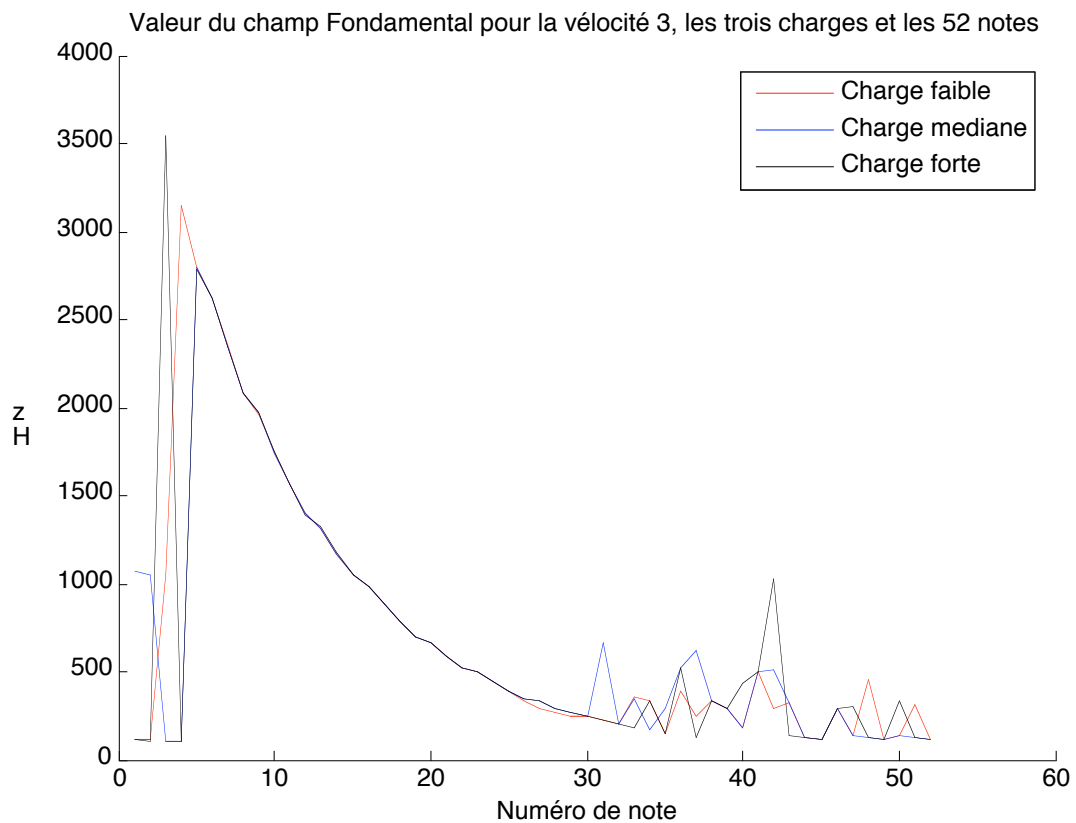
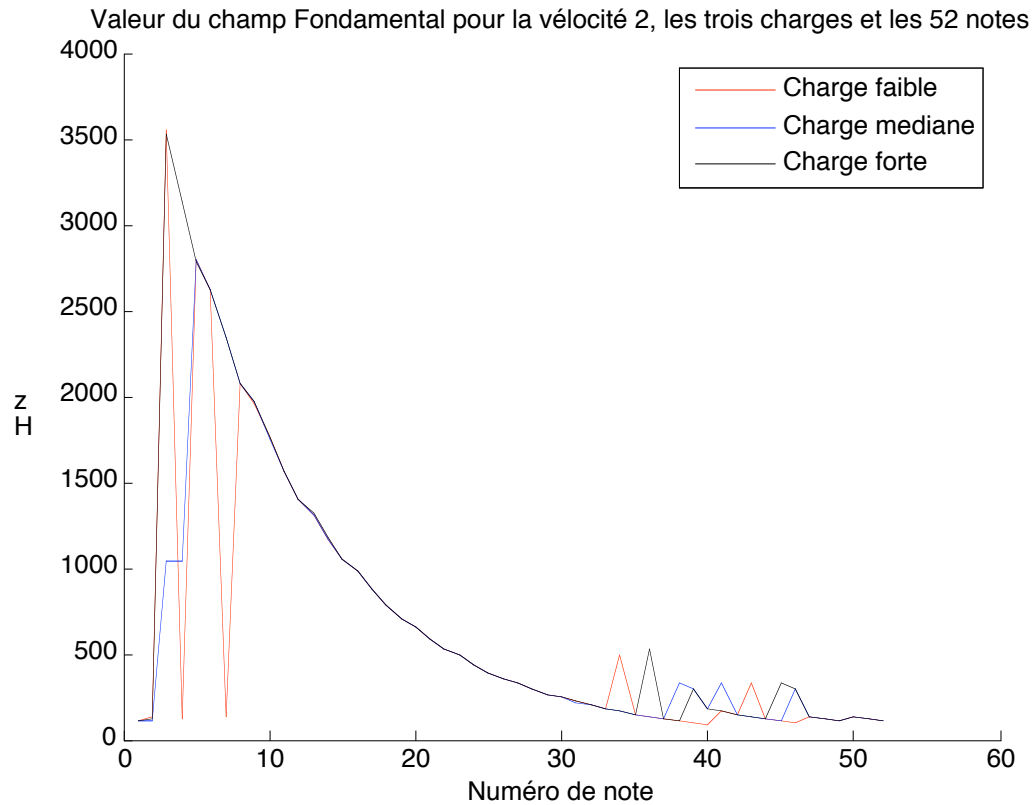
## Discussion de certains aspects remarquables

- Retour sur la validité de l'expérience : la justesse du piano

Un des premiers travaux que l'on puisse faire est de vérifier la validité de certaines hypothèses de l'expérience et en particulier la justesse du piano. On constate en effet que la charge n'a que très peu d'effet d'une manière générale sur la fréquence fondamentale des notes jouées, ce qui est plutôt heureux, puisqu'un accordeur a travaillé après la modification de charge du piano pour justement accorder l'instrument.

En observant les courbes ci après, présentant la valeur du champ « Fondamental » extrait des sons, on remarque que pour une grande partie de la tessiture du piano, les courbes coïncident entre les charges. Les sauts des courbes correspondent aux faiblesses de la méthode utilisée d'extraction du fondamental dans le cas de manque de partiels.





- Carte des coefficients de qualité des partiels : lien avec la corde vibrante

En étudiant pour chaque son la valeur d'amortissement de chaque partiel en fonction du temps, on peut pour chaque partiel extraire le coefficient



de qualité et ainsi obtenir pour chaque configuration (hauteur, intensité, charge) un profil en termes de coefficients de qualité, profil classique dans le cadre de l'étude des cordes vibrantes.

### **Limites et réflexions sur l'application au piano**

- *Pas d'étude perceptive pour l'instant*

Les notes des descripteurs quant à leur aspect catégorisant pour la charge (IRMFSP) sont à considérer à la lumière d'une obligatoire étude perceptive. A l'usage, n'étant pas un spécialiste moi-même de l'instrument, je constate qu'il y a en effet des différences perceptibles, mais je ne saurais pas dire si je suis capable d'une manière très infaillible de déterminer précisément quel son correspond à une charge plus forte ou plus faible, tous les autres paramètres étant conservés.

Il est indéniable que ce qui s'étudie s'entend, mais il est de première importance maintenant de comparer les résultats donnés ici avec ceux d'une étude perceptive à venir, afin de voir si les résultats peu convaincants des descripteurs est le signe d'une indiscernabilité des sons en général, ou bien de la non explicitation actuelle des descripteurs adéquats à l'étude du problème.

- *Quelques idées pour améliorer l'étude de l'impact de la charge*

Il est très difficile de modifier la charge de la table d'harmonie d'un piano. Il s'agit d'une opération délicate qui nécessite l'intervention d'un professionnel pour raccorder l'instrument. L'expérience qui fut réalisée consista à enregistrer 3 sons différents pour chaque note du piano avec une charge donnée : piano, mezzo, fortissimo.

Le passage à la statistique est ainsi fortement compromis. Disposer pour chaque note d'un grand nombre de sons, quitte à abandonner la reproductibilité de la charge, permettrait d'établir une étude statistique beaucoup plus fiable sur l'influence de la charge, au niveau quantitatif. Je pense donc que pour la prochaine expérience, il faudrait, bien sûr, faire une étude mettant en œuvre un plus grand nombre de charges, mais également un plus grand nombre d'intensités de frappe pour chaque note et chaque charge. Ceci est de plus justifié par le fait qu'on ne dispose de toute façon pas de reproductibilité de la mise en charge et qu'il est donc de toute façon impossible dans l'état actuel des choses de reproduire l'expérience parfaitement à l'identique.

## Application à d'autres études : collaborations

---

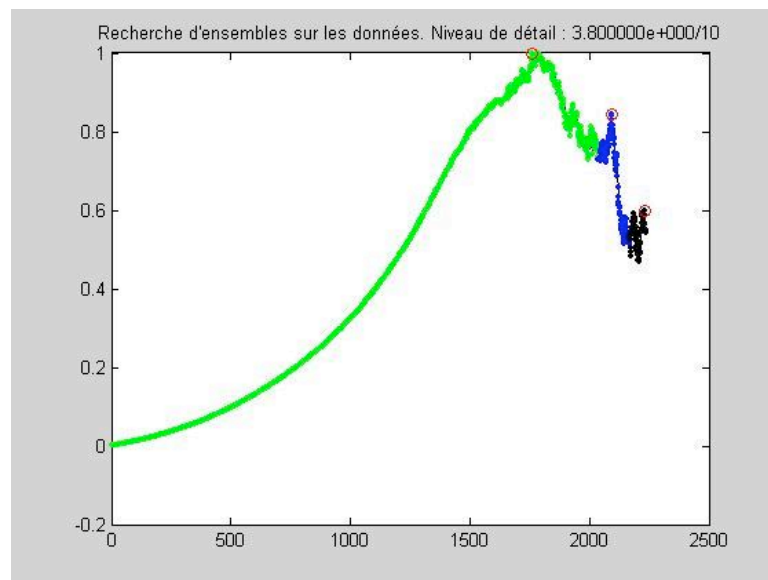
### La voix en environnement bruyant

Dans le cadre de sa thèse, Maëva Garnier (LAM) étudie les qualités de la voix en environnement bruyant et dispose à cette fin d'un corpus conséquent d'enregistrements fruits d'expériences auprès d'un nombre non négligeable de sujets, sur lesquels elle effectue des calculs de descripteurs. Dans la phase de traitement de son corpus, nous avons collaboré pour que l'outil de gestion de la base de données apporte également des réponses à ses problèmes en plus des miens. Cela a apporté un œil extérieur plutôt bénéfique et a conduit à l'implémentation d'un grand nombre de fonctionnalités, dont on trouvera la description dans le mode d'emploi fourni en annexe.

A ce jour, Maëva utilise cet outil dans ses travaux de recherche.

### Détection de la distance de cassure d'un jet

Anne Bagué dans le cadre de son stage de master en mécanique des fluides au LAM étudiait la forme des jets au sein d'une flûte à bec. Dans son travail de recherche s'est posé le problème de détecter la distance de cassure du jet par rapport à l'embouchure. Ceci fut réalisé en appliquant simplement la fonction de détection de pics avec un niveau de détail très faible, avec des résultats d'emblée totalement convaincants pour elle. Ci-dessous : un exemple d'un de ces jets et de la détection de pics.



*Exemple d'utilisation de la détection de pics*

### Catégorisation de sons de synthèse d'une plaque de bois

Une des orientations prises d'emblée par Joël Frelat dans la mise en place du stage fut de ne surtout pas se limiter au seul cas du piano mais plutôt d'ouvrir le cadre de l'étude au maximum, afin que les outils développés puissent servir dans un contexte

de recherche plus large. En particulier, le « cahier des charges » de l'outil à développer incluait un certain nombre de contraintes permettant de l'ouvrir à d'autres applications. Parmi elles, on trouve évidemment des fonctions d'import/export de données issues des calculs, mais aussi la possibilité de charger des données non initialement mises en forme pour l'outil et la mise en place aux prémisses du stage de la problématique de catégorisation, par le biais de la mise en parallèle de mon stage et de celui de ( ??? ) à l'occasion de sa maîtrise, qui a abouti à la synthèse d'un nombre important de sons de plaques de bois.

L'idée était de pouvoir effectuer sur ces sons une étude de type catégorisation, à partir des descripteurs classiques déjà évoqués dans ce document. Il s'agissait d'appliquer à ces sons exactement la même procédure que pour le piano, afin de voir quelles catégories semblaient émerger après un premier calcul grossier.

[résultats à mettre]

## Conclusion

---

[a propos des résultats sur le piano à proprement parler]

Ce stage fut tout d'abord l'occasion pour moi de m'insérer dans un contexte de recherche où collaborent un nombre important de chercheurs et de spécialistes dans des domaines connexes à la facture du piano (les réunions de l'atelier piano ont accueilli jusqu'à une quinzaine de personnes).

Cohérent, le projet de recherche initié par Charles Besnainou au sein du LAM laisse la porte ouverte à un grand nombre de spécialités très variées et c'est avec intelligence que je fus aiguillé vers une place où je crois que mes capacités furent mises en avant et utilisés au profit de tous, dans un esprit d'équipe et une communication très forte et permanente entre les membres du projet. J'avais quotidiennement des discussions sur mon avancement avec Charles Besnainou, Adrien Mamou-Mani, très régulièrement avec Joël Frelat et d'une manière générale je me suis senti soutenu et aiguillé lorsque j'en avais besoin autant sur le plan scientifique aussi que lorsqu'un choix s'imposait quant aux orientations à prendre.

Je fus cependant laissé très libre de mes actions et l'outil de gestion de base de données programmé lors de ce stage qui, je l'espère (!), me survivra au LAM, est le fruit de cette liberté. Ce n'est que parce qu'à aucun moment je ne me suis senti contraint que j'ai pu réaliser cet outil comme bon me semblait, à la vue des besoins de tous. C'est ainsi je pense un outil correspondant très bien aux attentes d'un grand nombre de chercheurs dans le domaine qui est le fruit de mon travail lors de ce stage. C'est dans un souci de pérennité qu'on trouvera en annexe à ce rapport un mode d'emploi complet permettant à quiconque en ressent le besoin de le prendre en mains et de l'utiliser à son tour. La programmation d'un tel outil m'a permis de très fortement confirmer ma connaissance du langage Matlab et m'a permis de mettre en application mes connaissances dans le domaine du génie logiciel qui correspondaient je crois au sein du Master à la particularité de mon profil.

D'un point de vue scientifique, le fait de manipuler autant de concepts dans le domaine du traitement du signal a été je pense un complément idéal de ma formation en la matière. J'ai assimilé un grand nombre de notions qui jusque là étaient assez abstraites pour moi et j'ai vécu à de nombreuses reprises l'excitation de faire des découvertes. Je crois avoir découvert avec ma méthode d'extraction de pics une technique offrant des performances d'excellente qualité et c'est avec de très bons souvenirs, voire avec de fortes velléités de collaborations futures, que je quitte aujourd'hui le Laboratoire d'Acoustique Musicale.

## **ANNEXE : Bibliographie**

---

[1] *A Large Set of audio features for sound description (similarity and classification) in the CUIDADO project*, v1.0 (23/04/2004) Geoffroy Peeters [www.ircam.fr](http://www.ircam.fr)

[2] *Hierarchical Gaussian Tree with inertia ratio maximization for the classification of large musical instruments database*, G. Peeters, X. Rodet, Proc. Of the 6<sup>th</sup> International Conf. on Digital Audio Effects (DAFX-03), London, UK, September 8-11-2003

## **ANNEXE : Présentation du Laboratoire d'Acoustique Musicale**

---

### **Historique**

Le LAM a été créé en 1963 dans le Département de Mécanique de la Faculté des Sciences par Emile Leipp, rapidement rejoint par Michèle Castellengo et Jean Sylvain Liénard. Les premières recherches se sont orientées sur le fonctionnement et la spectrographie des instruments de musique (classiques et traditionnels), sur le bruit (gêne des bruits faibles) et sur la parole, avec, dès cette époque, une alliance entre l'utilisation d'une représentation du signal en fréquence/amplitude/temps (le sonagramme) et son interprétation sur le plan perceptif. Par la suite, Jean Kergomard y a soutenu sa thèse sur le champ interne et externe des instruments à vent. L'activité de recherche a connu une grande diffusion grâce aux séminaires du G.A.M. (Groupe d'Acoustique Musicale) et aux différents enseignements mis en place tant au laboratoire que dans diverses institutions professionnelles: Ecoles de cinéma, Conservatoire National Supérieur de Musique.

Dès le départ d'E. Leipp en 1982, une nouvelle équipe se forme autour de M. Castellengo. Cette équipe reçoit le soutien du département SPI du CNRS, auquel s'ajoute rapidement celui du Ministère de la Culture. D'une part la Direction de la Musique subventionne plusieurs projets de recherche, met d'important équipements à disposition du laboratoire, et encourage le développement d'innovations en technique de fabrication d'instruments à cordes; d'autre part, la Direction du Patrimoine manifeste son souci d'une prise en compte rigoureuse des problèmes d'acoustique au sein de la commission des orgues historiques. Les compétences de l'équipe en acoustique de l'orgue, étendues par la suite aux cloches et carillons lui valent d'être sollicitée régulièrement pour des évaluations de restauration ou de nouvelles implantations d'orgues.

Ces liens institutionnels se formalisent au 1er janvier 1993 par la création d'une Unité Mixte de Recherche entre le CNRS (département SPI), l'Université Pierre et Marie Curie (UPMC) et le Ministère de la Culture. L'engagement de ces partenaires sur un contrat renouvelable tous les quatre ans garantit un travail à long terme. En 1994, le LAM joue un rôle important dans la création d'un DEA qui réunit autour de l'IRCAM plusieurs laboratoires opérant en Acoustique, Traitement de signal et Informatique Appliqués à la Musique (DEA ATIAM, aujourd'hui dirigé par M. Castellengo). Ces deux événements consacrent la reconnaissance d'une discipline originale dans ses enjeux et ses méthodes, et créent un pôle attractif pour les jeunes chercheurs, les visiteurs étrangers et les spécialistes de disciplines connexes.

Depuis 1993 le LAM développe un axe de recherche relatif à l'environnement sonore (perception des bruits, acoustique architecturale et urbaine), notamment grâce à l'arrivée de J.D. Polack et à la collaboration avec D. Dubois (LCPE, département SHS du CNRS). En 1997, la Bibliothèque nationale de France installe au LAM ses études sur la conservation et la restauration des enregistrements sonores, et bientôt audio-visuels. En 2003 Danièle Dubois et son équipe sont accueillis au laboratoire.

Les formations initiales des membres permanents du laboratoire sont très variées (musique, physique du solide, physique appliquée, télécommunications, acoustique, mécanique,...), et il est à souligner que tous ou presque ont une double formation, scientifique et musicale, à laquelle ils joignent une pratique musicale active.

Pendant l'opération de désamiantage du campus de Jussieu le laboratoire a été installé au 11 Rue de Lourmel où il dispose de 800 m<sup>2</sup> abritant bureaux, bibliothèque, locaux d'écoute, salles d'expérimentations physiques, ainsi que plusieurs équipements spécifiques : une salle d'écoute sourde (simulations d'ambiances sonores écologiquement valides), une salle d'écoute claire (évaluation de qualité des instruments de musique), une cabine de psychoacoustique, trois studios analogiques et numériques de traitement des sons, un atelier de lutherie traditionnelle et de matériaux composites, un laboratoire de conservation des documents sonores, un laboratoire photographique et un atelier d'électronique.

## **Présentation des activités**

L'acoustique musicale concerne l'étude des phénomènes sonores dans leur rapport avec la musique.

L'acoustique connaît depuis quelques décennies des développements considérables liés à ceux des techniques de saisie, d'analyse et de synthèse des signaux vibratoires. Parallèlement, la production musicale a été enrichie par les nouvelles techniques d'élaboration et de diffusion du son, suscitant une importante demande d'information sur la caractérisation des sons, leurs modes de production, leur rayonnement et les divers problèmes de perception qui s'y rattachent. Les chercheurs en acoustique musicale, que l'on pouvait compter sur les doigts d'une main en France en 1962 représentent aujourd'hui une trentaine de personnes (sans compter les doctorants) réparties dans sept équipes. Ce développement a été conforté par les actions du Ministère de la Culture en faveur de la musique : développement de nombreuses écoles et conservatoires de musique, création de l'[IRCAM](#), soutien de la facture instrumentale française, création de la Cité de la Musique à la Villette, importantes actions en faveur du patrimoine musical.

Dès qu'il s'agit d'évaluer des résultats de mesures sur un instrument de musique, sur une salle ou même sur un enregistrement (en vue par exemple d'en améliorer la qualité), se pose le difficile problème de l'identification des paramètres physiques pertinents au plan perceptif. L'établissement de critères de base passe par l'étude de la perception des sons musicaux, sons complexes qui posent des problèmes analogues à ceux de notre environnement sonore naturel : problèmes d'identification (timbre, hauteur) de qualification (sonorité, justesse, nuances d'intensité), et de compréhension du contexte. Même lorsqu'il paraît simple, l'instrument de musique est un objet ayant atteint empiriquement un très haut degré d'élaboration et qui permet de produire des sons extrêmement efficaces à l'oreille avec une grande économie de moyens. La modélisation s'avère difficile car elle nécessite une grande exigence pour prendre en compte les éléments significatifs (termes du second ordre, non-linéarités, mécanismes habituellement laissés de côté, etc.).

L'étude réaliste du fonctionnement d'un instrument de musique nécessite la prise en compte d'éléments hétérogènes : la source (mécanique : instruments traditionnels ou maintenant informatique et électroacoustique : synthèse sonore), le milieu de diffusion (salle ou autre), l'auditeur (actif ou passif, musicien ou non). Dès la création du laboratoire, ce point de vue a été affirmé et constitue la ligne de conduite de nos recherches. Les nombreux contacts avec les facteurs et les instrumentistes nous en ont confirmé le bien-fondé, et la double formation - scientifique et musicale - des chercheurs en a permis le développement au travers de nombreuses collaborations.

Travailler sur les instruments de musique, la synthèse sonore, les salles de concert, implique naturellement de faire appel à plusieurs disciplines des sciences physiques et humaines. Réciproquement, les résultats des recherches trouvent des applications dans d'autres champs des domaines concernés (industrie automobile par exemple). Les activités du laboratoire peuvent se présenter schématiquement sous les rubriques suivantes :

Thèmes de recherche	Domaines scientifiques de référence
<b>Instruments de Musique et Voix</b>	
* Physique des instruments de musique * Factice instrumentale	<i>Dynamique des vibrations – Acoustique – Mécanique - Matériaux et structures</i>
<b>Techniques Audio</b>	
* Synthèse sonore numérique et hybride * Reproduction du son et conservation de l'information sonore	<i>Informatique - Traitement du signal - Electroacoustique - Contrôle actif - Chimie du vieillissement</i>
* Acoustique des lieux d'écoute (salles de concert, espaces extérieurs)	<i>Acoustique architecturale et urbaine</i>
<b>Cognition et Perception</b>	
* Etude des sons musicaux (hauteur, intensité, timbre, sonorité).	<i>Psychoacoustique</i>
* Caractérisation des sources et des lieux. * Qualification des environnements et des scènes sonores.	<i>Sciences cognitives - Psychologie - Sémantique</i>



## **ANNEXE : Plan du dossier technique de la base de données**

---

### **Présentation de la base de données**

Introduction : un cas d'application

Modélisation et termes utilisés

Les différents scénarios

- Chargement dans la base de données d'un ensemble de fichiers indexés
- Recherches sur la base de données
- Calcul de descripteurs sur les éléments, études statistiques
- Catégorisation d'un ensemble d'éléments

### **Présentation de l'API**

Introduction

Présentation des structures de données

Fonctionnalités relatives à la base de données

Fonctionnalités relatives aux nœuds

Fonctionnalités relatives aux éléments

Fonctionnalités relatives aux numéros

Fonctionnalités relatives aux études statistiques

Exemples d'utilisation : quelques scripts

### **Présentation d'InterfaceBD**

Introduction

Questions d'intendance

- Comment lancer et utiliser InterfaceBD ?
- Comment sauver/charger/mettre à jour l'affichage de la base ?

Questions relatives à la structure de la base

- Comment créer un Niveau à ma base de données ?
- Comment créer un Nœud ?
- Comment sélectionner un Nœud ?
- Comment supprimer un Nœud ?

Question relatives à la modification des Nœuds

- Comment modifier les données d'un Nœud (hors champs spécifiques) ?
- Comment modifier les champs spécifiques d'un Nœud ?

Questions relatives à la gestion des Elements

- Comment créer un Element ?
- Que signifie le checkbox « Afficher chemins partiels » ?
- Où et comment sont affichés les éléments sélectionnés ?

### Questions relatives à la gestion des Champs

- Quelle est la différence entre les deux listes de champs ?
- Comment modifier les valeurs des champs des éléments ?
- Comment utiliser «Forcer une valeur» ?
- Comment utiliser « Calculer depuis une fonction » ?
- Qu'est ce que le bouton « Calculs éponymes » ?
- Comment fonctionne l'outil d'import/export en mode texte ?
- Comment importer dans ma base des données du disque dur ?

### **Conclusion**