

M2 ATIAM

Année universitaire 2010-2011

PARCOURS MASTER 2
ATIAM
Parcours multi-mention du Master Sciences et Technologies
Université Pierre et Marie Curie - Paris 6
en collaboration avec TELECOM ParisTech et l'Ircam

LAM
Lutheries - Acoustique - Musique
Institut Jean le Rond d'Alembert
Université Pierre et Marie Curie
Centre national de la recherche scientifique
Ministère de la Culture et de la Communication

UPMC
SORBONNE UNIVERSITÉS

**cité
de
la musique**

Rapport de stage

*Etude d'un système   retour
d'effort simulant la touche
d'expression des Ondes
Martenot*



Thibaut Meurisse

Encadrants :

**Laurent Quartier
Stéphane Vaiedelich
Charles Besnainou**

Université Pierre et Marie Curie
Laboratoire Lutherie, Acoustique, Musique (LAM)
Laboratoire de la Cité de la Musique - Conservation et Recherche

Table des matières

1	Introduction	5
1.1	Objet	5
1.2	Laboratoires	5
1.2.1	L’Institut Jean Le-Rond D’Alembert - Equipe Lutherie Acoustique Musique	5
1.2.2	Cité de la Musique - Conservation et Recherche	5
1.3	Les Ondes Martenot : un peu d’histoire	6
1.4	Objectifs et déroulement du stage	8
2	Protocole de mesure	9
2.1	Montage expérimental	9
2.2	Capteurs	10
2.2.1	Enfoncement	10
2.2.2	Force	12
2.3	Chaîne de mesures	17
2.3.1	Les cartes d’acquisition	17
2.3.2	Problèmes de mesures des hautes impédances	17
2.3.3	Microphones	18
3	Résultats	19
3.1	Aspect électrique	19
3.2	Aspect audio	23
3.3	Modélisation du comportement électro-acoustique	25
3.4	Aspect Mécanique	30
3.5	Aspects globaux	32
4	Modélisation mécanique de la touche d’expression	36
4.1	Modèle	36
4.1.1	Poutre encastrée-libre	36
4.1.2	Poutre encastrée-appui-libre	37
4.1.3	Raccord	38
4.2	Vérification expérimentale	39
4.3	Conclusion	40
5	Simulation de la touche par un système haptique à retour d’effort	41
5.1	Tour d’horizon et choix de notre système	41
5.2	Falcon : calibrage et tests	42
5.3	Simulation	44
5.4	Test avec un musicien	48
6	Conclusion	50

A	Annexe : Schéma de principe du fonctionnement des Ondes Martenot (©[6])	55
B	Annexe : Résultats expérimentaux : figures diverses	56
C	Annexe : Patch Max/MSP	68
D	Annexe : Notice du Falcon avec Matlab	69
E	Annexe : plans du fac-similé de la touche d'expression	70
F	Annexe : plans du bras de levier	71
G	Annexe : valeurs numériques utilisées pour le modèle mécanique	72
H	Annexe : vitesse d'exécution du programme de simulation selon les caractéristiques de l'ordinateur utilisé	73

Remerciements

Bien des personnes sont à remercier pour avoir permis à ce stage d'être mené à bien :

Tout d'abord, Laurent pour sa présence quasi-quotidienne, son aide, ses conseils, la fabrication de la touche, des 2 leviers, etc...

Ensuite, Stéphane pour m'avoir permis d'accéder à son laboratoire ainsi qu'au CNSM, ainsi que pour ses conseils multiples

Charles pour m'avoir accordé sa confiance et proposé ce stage, ainsi que pour ses précieux conseils électroniques et méthodiques

Valérie Hartman pour nous avoir laissé l'accès à sa salle de cours du CNSM, et aux Ondes Martenot qui y sont

Joël Frelat pour son aide lors de l'élaboration du modèle mécanique

Jean-Loup Dierstein pour ses conseils et sa connaissance des Ondes Martenot

Nadia et Augustin, pour leurs aides, remarques et connaissances des Ondes Martenot, ainsi que pour la participation d'Augustin au test

Henri pour sa patience et sa pédagogie

Hugues, Joachim, Maxime pour leur aide inestimable sur Pure Data

Marguerite pour ses remarques et son utilisation de mon travail

Diandra pour les amicales prises de bec

Arthur et Benoit pour les guitares

L'ensemble des stagiaires et doctorants lamiens : Arthur, Cédrik, Delphine, Diandra, Fabio, Henri, Indiana, Joachim, Marguerite, Maxime, Roman, Shu, Sylvain, ainsi qu'à l'ensemble du LAM

Marie, Lory, Laura Mae, Sandie à la Cité de la Musique

Jon, Eric and Manav Kataria for the support about the Falcon

La bande de faucons de mon bureau

Et à ceux que j'ai oublié...

1 Introduction

1.1 Objet

Mon stage a porté sur la touche d'expression des Ondes Martenot, l'un des plus anciens instruments de musique électronique. Ce stage s'inscrit dans une démarche tant scientifique qu'historique. D'une part, il cherche à comprendre en détail le fonctionnement de cette touche d'expression. D'autre part, il tient un rôle dans la conservation/restauration, cherchant à améliorer la connaissance de l'instrument dans le but de le rendre pérenne : en comprenant le vieillissement de la poudre et tenter de remplacer la touche d'expression par un robot.

1.2 Laboratoires

J'ai effectué mon stage entre deux laboratoires, celui de l'équipe Lutherie Acoustique Musique (LAM) [1] de l'Institut Jean Le-Rond d'Alembert (IJLRA), et celui de la Cité de la Musique [2], Conservation et Recherche.

1.2.1 L'Institut Jean Le-Rond D'Alembert - Equipe Lutherie Acoustique Musique

Le LAM fait partie de l'Institut Jean Le-Rond d'Alembert, le laboratoire de mécanique de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris VI). Il est sous la tri-tutelle de l'UPMC, du CNRS et du Ministère de la Culture. Ce laboratoire a pour particularité d'être centré sur l'étude du son et de la musique en tant qu'objets culturels; aussi ils sont abordés tant du point de vue des sciences pour l'ingénieur (physique, acoustique, traitement du signal) que des sciences humaines (psychologie cognitive, linguistique).

Les domaines d'études y sont donc multiples, et réparties en trois catégories :

- Instruments de musique et Voix
- Perception et Cognition
- Techniques Audio, Acoustique des Salles

Ces différentes catégories peuvent se croiser au cours des études. Ainsi mon travail portant sur les Ondes Martenot, un instrument de musique, a aussi demandé un travail du point de vue de la perception.

1.2.2 Cité de la Musique - Conservation et Recherche

Le laboratoire de la Cité de la Musique, Conservation et Recherche, est sous la tutelle du ministère de la Culture. Il englobe des activités de trois types :

- Les activités patrimoniales : Conservation préventive et curative des oeuvres en collection ou en prêt, Gestion technique et scientifique des interventions de restauration et Conservation des collections immatérielles
- Les activités de recherche : Etude de l'évolution des systèmes physiques sous contrainte et Etude de l'évolution des systèmes chimiques et physico-chimiques

- La veille technologique (avancées technologiques en caractérisations chimiques et physiques, contrôle non destructif, saisie d’images et d’informations 3D, acoustique musicale, etc...)

Les premiers travaux sur les Ondes Martenot ont été réalisés ici et présentés à l’occasion du CIM09 [3].

1.3 Les Ondes Martenot : un peu d’histoire

Les Ondes Martenot, dont le nom vient de son inventeur Maurice Martenot (1898-1980), sont un instrument de musique électronique dont la genèse remonte à la fin de la première guerre mondiale, et dont le premier modèle fut présenté à l’Opéra de Paris en 1928 [4]. De nombreux compositeurs ont écrit pour cet étonnant instrument, l’un des plus célèbres étant Olivier Messiaen [5]. De 1918 à aujourd’hui, les Ondes Martenot ont beaucoup changé d’aspect. Il y eu en fait 7 instruments différents [6]. Le premier, composé d’un coffret et d’une antenne, se jouait à distance et était très similaire au Thérémine russe, créé à la même époque. Il acquit ensuite son fameux ruban et sa bague, 10 ans plus tard. C’est ce modèle, simplement joué avec un ruban, qui fut présenté en 1928. L’instrument continua à évoluer jusqu’à atteindre sa septième et dernière forme au début des années 1970 (voir figure 1) :



Figure 1 : Ondes Martenot

Plusieurs choses sont observables sur cette photographie. Tout d'abord on remarque un clavier. Il faut savoir que les Ondes Martenot sont un instrument monophonique : il ne joue qu'une note à la fois. On peut donc avec le clavier définir la note jouée. Mais comment passer du clavier à un son ? Les Ondes Martenot "créent" des sons de manière ingénieuse : à l'aide d'un système hétérodyne (comme pour les récepteurs radioélectriques). Pour cela, Martenot a placé une résistance sous chaque touche du clavier. Tout à droite du clavier, on peut voir la bague, enfilée sur le ruban qui parcourt toute la largeur du clavier. Ce ruban est relié à un potentiomètre qui a la même fonction que les résistances du clavier. Ce ruban a la particularité de permettre des glissendi sur 6 octaves ! Quand le musicien joue au ruban, le clavier garde un rôle de repère quant à la note jouée. Sous le clavier, on voit différentes molettes qui servent à l'accord et aux réglages de l'instrument. Reste, à gauche, le casier de l'instrument. Ce casier contient tous les boutons permettant de contrôler le son de l'instrument, soit la forme du son (sinusoïde, signal carré, signal triangulaire, etc...), le diffuseur (D1, gong, palme), la bague ou le clavier, etc... En particulier, ce casier contient la touche d'expression des Ondes Martenot (la touche blanche, légèrement à droite dans le casier). C'est dans cette touche que réside toute la magie de cet instrument. On va donc s'y intéresser d'un peu plus près. Une fois retirée, la touche ressemble à ceci (figure 2) :

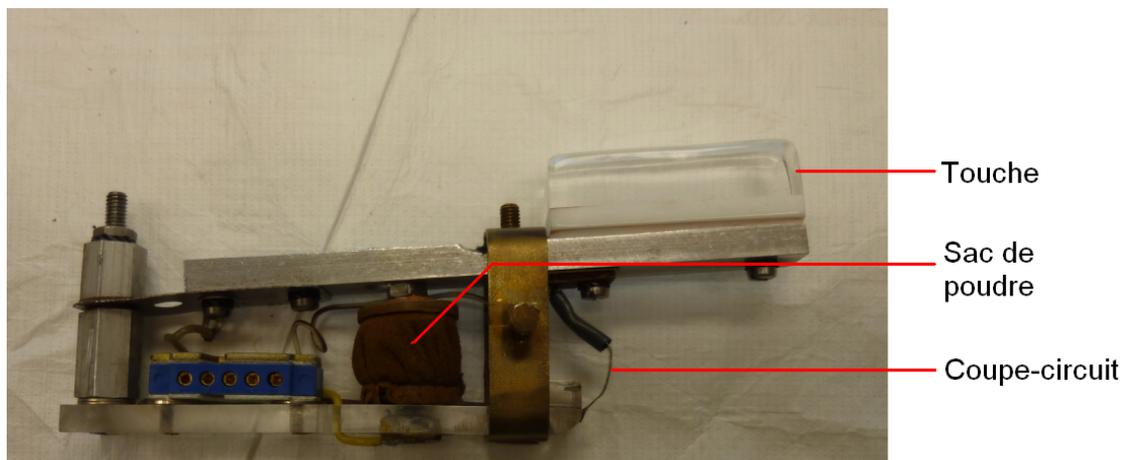


Figure 2 : Touche d'expression des Ondes Martenot

Deux choses sont à remarquer ici. Tout d'abord, il y a ce petit sac de cuir placé sous la touche. C'est en ce petit sac que réside tout le secret des Ondes Martenot. Ce petit sac contient une poudre "magique" [3] d'éléments conducteur et isolant, et constitue un rhéostat permettant de contrôler très finement l'intensité et la durée des sons, mais aussi leurs attaques et leurs extinctions. En effet, en appuyant sur la touche, on appuie sur le sac, sa résistance électrique diminue, l'intensité du son augmente. Ensuite, on voit cette petite lamelle de métal à l'extrémité de la touche. Elle fait office de coupe-circuit. Quand la touche est relevée, on souhaite qu'il n'y ait plus aucun son. Or, même si la résistance électrique du sac devient très importante, le courant peut toujours passer et il subsiste un son. Ce coupe-circuit permet d'éviter cela. Il est réglé par le musicien de

sorte à couper le son jusqu'à un certain enfoncement.

En 1980, Maurice Martenot nous quittait, emportant le secret de fabrication de la poudre, dont la durée de vie est d'environ 10 ans.

1.4 Objectifs et déroulement du stage

Avant le début de ce stage, quelques travaux avaient déjà été effectués. En particulier, nous disposions d'un schéma de principe des Ondes Martenot, très détaillé (Annexe A, [6]). Mais surtout, nous disposions des travaux réalisés par Stéphane Vaiedelich pour le CIM09 [3] portant sur le sac de la touche d'expression de l'instrument. De ces travaux, on peut tirer deux informations très importantes :

- Le sac est composé d'une poudre réunissant deux phases, l'une constituée de mica, l'autre de graphite
- Le sac se comporte comme un rhéostat, avec $\log(R)$ (R la résistance électrique du sac) variant linéairement avec l'enfoncement (sous réserve d'attendre deux minutes qu'un "équilibre" soit atteint)

Ceci nous amène à nous poser plusieurs questions, que l'on regroupera dans deux catégories :

- La touche : une interface
 - Comment fonctionne la touche ?
 - Le fonctionnement de la touche est-il reproductible en situation de jeu ?
 - Le musicien contrôle-t-il son geste par la force qu'il applique ou par l'enfoncement de la touche (en complément de l'oreille) ?
- Sous la touche : le sac de poudre
 - A-t-on des effets capacitifs ? (a-t-on une dépendance en fréquence de l'effet "électrique" ?)
 - Comment vieillit la poudre ?
 - **Peut-on simuler le comportement de la poudre avec un dispositif haptique à retour d'effort** (ceci permettant de modifier finement les paramètres de contrôle de l'instrument) ?

Ainsi, l'objectif de ce travail est de créer une réplique de la touche d'expression qui reproduise le ressenti du musicien, toutes choses égales par ailleurs.

Pour cela, on doit caractériser le comportement mécanique et électrique du sac. On a réalisé des mesures de pression et d'enfoncement sur une touche d'Ondes Martenot en fonctionnement, ainsi que de la résistance électrique du sac et du son émis par le diffuseur de l'instrument. L'analyse de nos résultats et l'établissement d'un modèle mécanique ont ensuite permis de programmer un joystick à retour d'effort de sorte qu'à une position donnée, il réponde une certaine force et pilote l'amplitude d'un son (généralisé via un synthétiseur) où force et amplitude sont tirées des mesures.

2 Protocole de mesure

De nombreuses mesures ont été réalisées sur un instrument du CNSM. Afin de reproduire le ressenti du musicien sur la touche, ainsi que de comprendre le fonctionnement de l'instrument, il nous a fallu mesurer plusieurs choses : la force et l'enfoncement sur la touche, le comportement électrique du sac, le son émis par le diffuseur.

2.1 Montage expérimental

On peut schématiser notre montage expérimental comme en figure 3 :

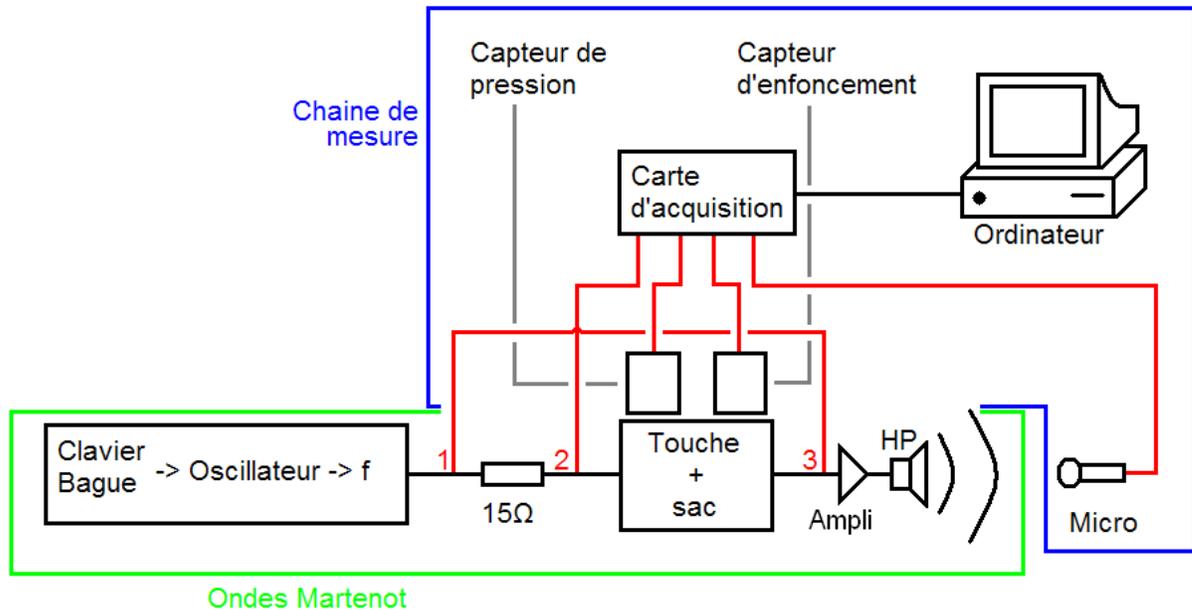


Figure 3 : Schéma du montage expérimental

On a rajouté une résistance connue de 15Ω pour pouvoir calculer le courant traversant le sac, sans perturber le système, la résistance du sac variant du $M\Omega$ à quelques centaines d' Ω [3]. En ayant des données sur la tension avant et après le sac ainsi que le courant, on aurait pu obtenir la résistance du sac en utilisant la loi d'Ohm. Cependant, il s'est avéré que pour les très hautes impédances, le courant était noyé dans le bruit car trop petit (de l'ordre du μA) pour pouvoir être mesuré.

2.2 Capteurs

2.2.1 Enfoncement

Choix du capteur

Il nous fallait un capteur peu encombrant, précis et rapide (moins de 5 ms [7]), pouvant s'adapter sur la touche d'expression. Des premières mesures réalisées à la règle ont montré des variations d'enfoncement de l'ordre du cm sous le doigt. On a donc cherché un capteur pouvant mesurer ces distances relativement petites avec une grande précision. On a finalement opté pour un capteur inductif à courants de Foucault, le DW-AD-509-M12 de Contrinex [8], permettant de mesurer des distances comprises entre 0 et 6mm avec une reproductibilité à $\pm 0,01\text{mm}$. Il produit à l'extrémité de sa tête de détection un champ magnétique oscillant. Si un objet métallique (cible) s'approche de la surface active du capteur, des courants de Foucault sont générés. Il en résulte une baisse d'énergie dans le circuit oscillant et une atténuation des oscillations et ce de façon instantanée. On peut alors déduire la distance séparant le capteur de la cible [9]. Son principal intérêt est d'être sans contact, donc il ne perturbe pas le jeu du musicien.

Calibrage et incertitude

On a eu recours à une réplique de la touche d'expression des Ondes Martenot (plans en annexe D) pour calibrer le capteur d'enfoncement (figure 4). L'idée est de mesurer l'enfoncement de la touche sous le doigt à partir de l'enfoncement de l'extrémité opposée de la touche, de sorte à ne pas déranger le musicien lors de la mesure. De plus, cela permet de compenser la limite de distance mesurable par le capteur (de 6mm maximum), la cible s'enfonçant moins que le bout de la touche.

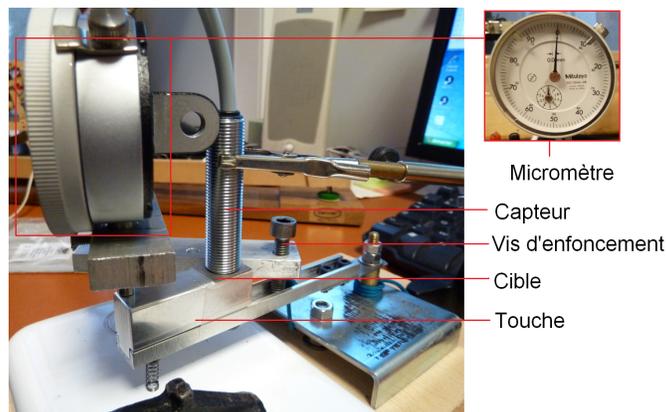


Figure 4 : Calibrage du capteur d'enfoncement

On a ainsi pu mesurer la tension électrique sortant du capteur pour des enfoncements du bout de la touche de 0 à 11,5mm. Des mesures d'aller et de retour ("en enfoncement", "en relevant") ont permis d'observer une grande répétabilité des résultats (figure 5). L'hystérésis observée en relevant la touche étant très petite (de l'ordre de l'incertitude),

on a décidé de l'ignorer lors des mesures effectuées sur les Ondes Martenot.

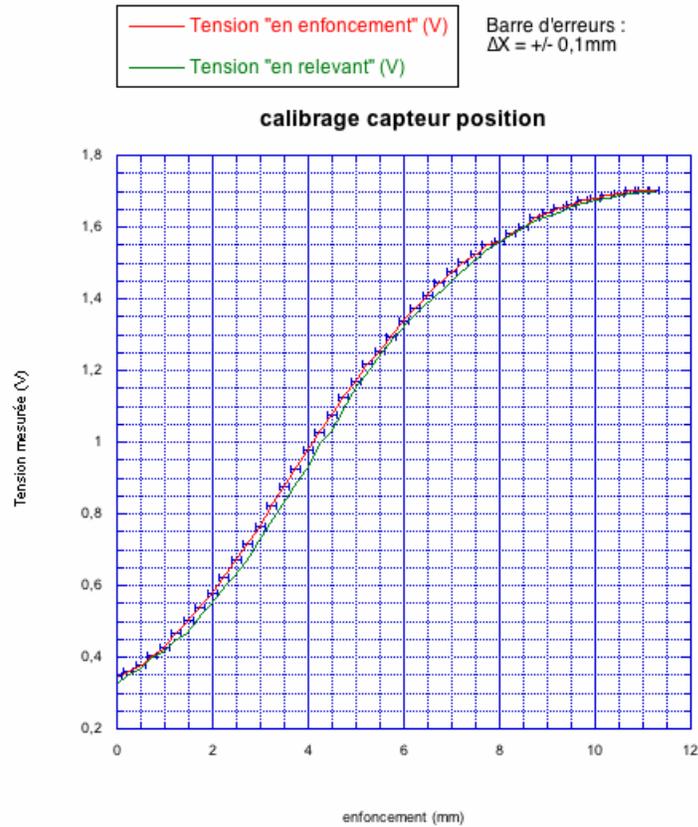


Figure 5 : Calibrage du capteur d'enfoncement

Pour estimer l'incertitude des mesures, on a utilisé la possibilité de recalibrer nos courbes expérimentales grâce à "l'instant de décalage" du coupe-circuit. A cet instant, le courant passe dans le sac, ce qui apparaît immédiatement sur la mesure de V_3 (figure 6) .

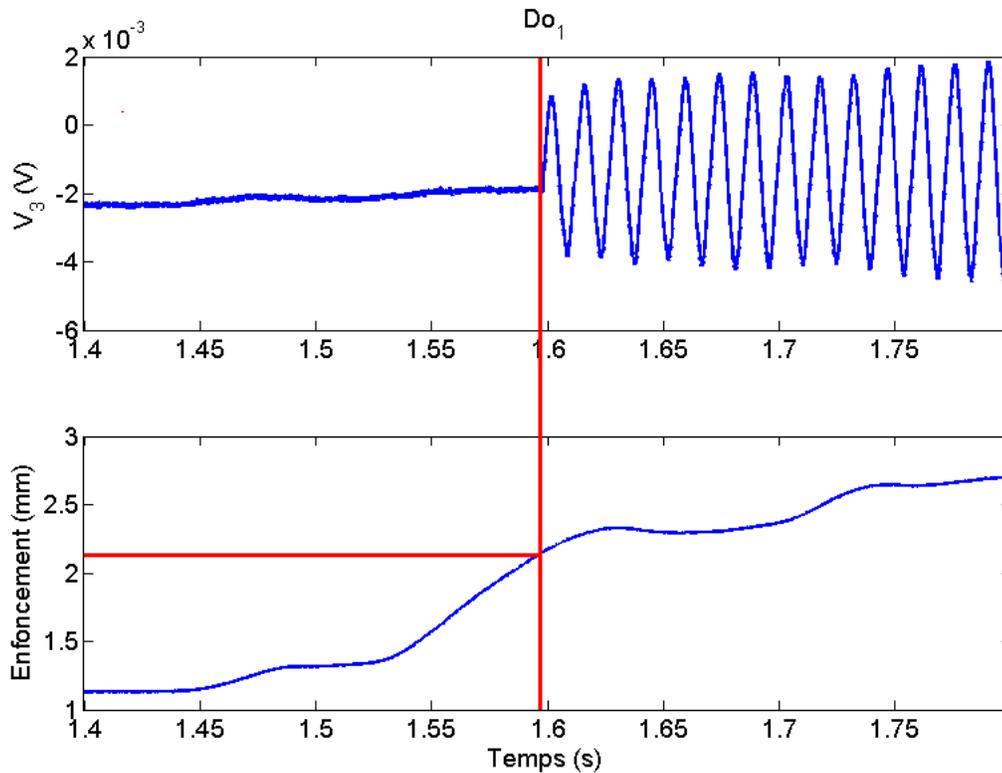


Figure 6 : "Instant de déclipsage"

A chaque mesure, on a repéré l'enfoncement correspondant au déclipsage du coupe-circuit. Celui-ci est physiquement toujours le même (tant qu'on ne touche pas à ce réglage particulièrement délicat, et crucial pour le jeu de l'Ondiste, puisqu'il fixe le "moment d'apparition" du son). Pourtant :

- à l'intérieur d'une même session de mesures (journée au CNSM), on s'aperçoit que la valeur mesurée fluctue de $\pm 0,08\text{mm}$
- d'une session à l'autre, la valeur peut varier de presque 1mm

La variation d'une session à l'autre s'explique par la différence de positionnement du capteur (surtout la distance initiale par rapport à la cible métallique).

Ainsi, on estime que l'incertitude de notre capteur vaut $\pm 0,08\text{mm}$, sous réserve de recalibrer les courbes de sessions différentes en utilisant l'instant de déclipsage.

2.2.2 Force

Choix du capteur

De même, il nous fallait un capteur peu encombrant, pour être adapté sur la touche, et ne pas déranger le musicien pendant le jeu. Il fallait également qu'il soit précis et rapide. Il existe trois types de capteur de force :

- les polymères piézoélectriques
- les extensomètres
- les FSR (Force Sensing Resistors) [10, 11, 12, 13]

Pour des raisons de coûts et d'encombrement, on a finalement opté pour un capteur de type FSR. Selon la brochure [10], les FSR ont les caractéristiques suivantes :

- une épaisseur de 0,2 à 0,75mm, donc suffisamment petite pour pouvoir être ignorée sous le doigt
- une fidélité de $\pm 5\%$, donc une erreur assez faible
- un temps de montée mécanique de 1 à 2ms, une réponse suffisamment rapide
- bon marché
- leur résistance diminue d'autant plus que l'on appuie fort dessus

En effet, ils sont composés de deux feuilles polymères, l'une recouverte d'un réseau d'électrodes à plages intercalées, l'autre d'un matériau semi-conducteur (cf figure 7). Quand on appuie sur le FSR, le semi-conducteur shunte plus ou moins les électrodes. Ainsi la résistance électrique diminue et la tension en sortie du capteur augmente. On peut alors en déduire la pression exercée.

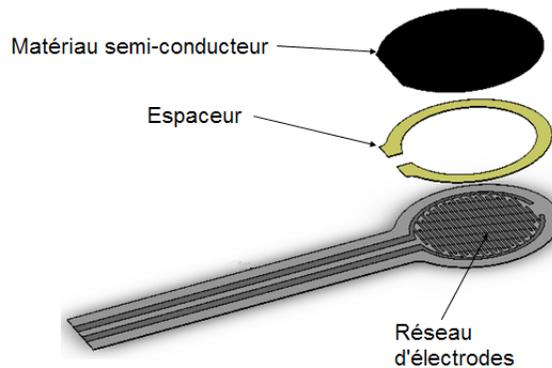


Figure 7 : Capteur FSR ([11])

Cependant, d'autres tests ont été faits sur ces capteurs auparavant [11], et ont montré une erreur de l'ordre de 7% test après test (due à la température, le vieillissement, etc...). Il faudra donc calibrer précisément le capteur.

Problèmes : calibrages et incertitudes

”Calcul” d’incertitude

On calcule l'erreur totale Δ sur la précision des mesures, lors des différentes calibrations du capteur :

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3. \quad (1)$$

Avec :

- Δ_1 : la précision de la mesure ("resolution" en anglais)
- Δ_2 : la dispersion statistique ("precision" en anglais)
- Δ_3 : l'erreur systématique ("accuracy" en anglais)

Δ_1 correspond à la précision de la carte d'acquisition (typiquement 0,5%) .

Δ_3 dépend de la tension d'alimentation (puisque ce capteur est une simple résistance variable).

Dans notre cas, c'est Δ_2 qui est prépondérant (voir [11]). Pour estimer cette dispersion statistique, on va réaliser plusieurs calibrages (à l'aide d'une balance, précise au gramme). On calcule la valeur moyenne \bar{X} de la tension délivrée par le capteur, ainsi que la variance $\hat{\sigma}$:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \quad (3)$$

On a alors $\Delta_2 = k \cdot \hat{\sigma}$ où k désigne "l'intervalle de confiance" . Dans notre cas, on choisit de prendre k=2, soit un intervalle de confiance de 95% : on a ainsi 95% de chances que la valeur réelle x de la valeur mesurée soit comprise dans un intervalle $[\bar{X}-\Delta, \bar{X}+\Delta]$.

Amélioration de l'incertitude

- Afin de diminuer Δ_3 , on s'assure de contrôler la tension d'alimentation du capteur à $\pm 0,01V$ près. Ainsi, Δ_3 vaut 0,2%
- Afin de diminuer Δ_2 , on a appliqué sur le capteur une rondelle en mousse, obligeant le doigt à appuyer toujours au même endroit, au centre du capteur. Il faut remarquer que cette solution est bien compatible avec le geste de l'Ondiste (figures 8 et 9)

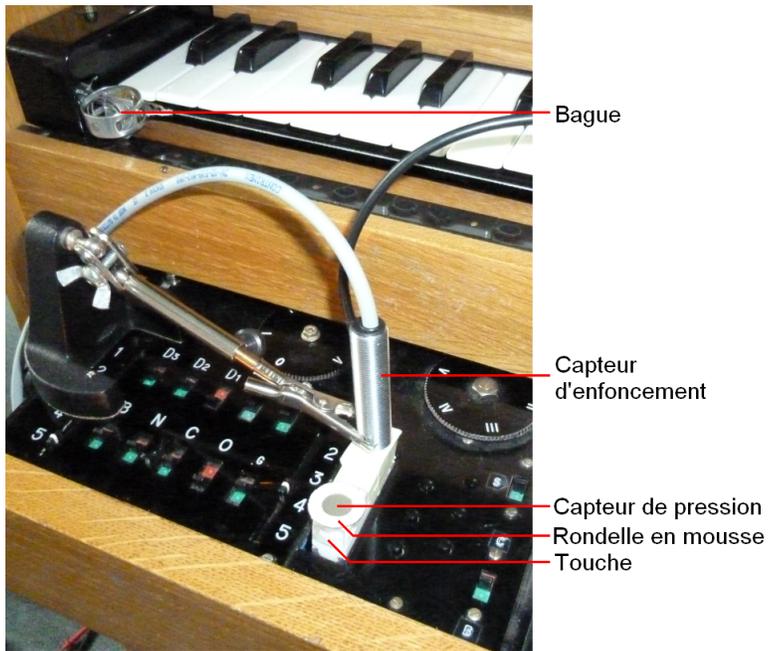


Figure 8 : Capteurs sur la touche d'expression des Ondes Martenot



Figure 9 : Geste de l'ondiste ([6])

Calibrage final

A partir de nos 8 calibrages à la balance (224 points de mesures), on obtient (figure 10) :

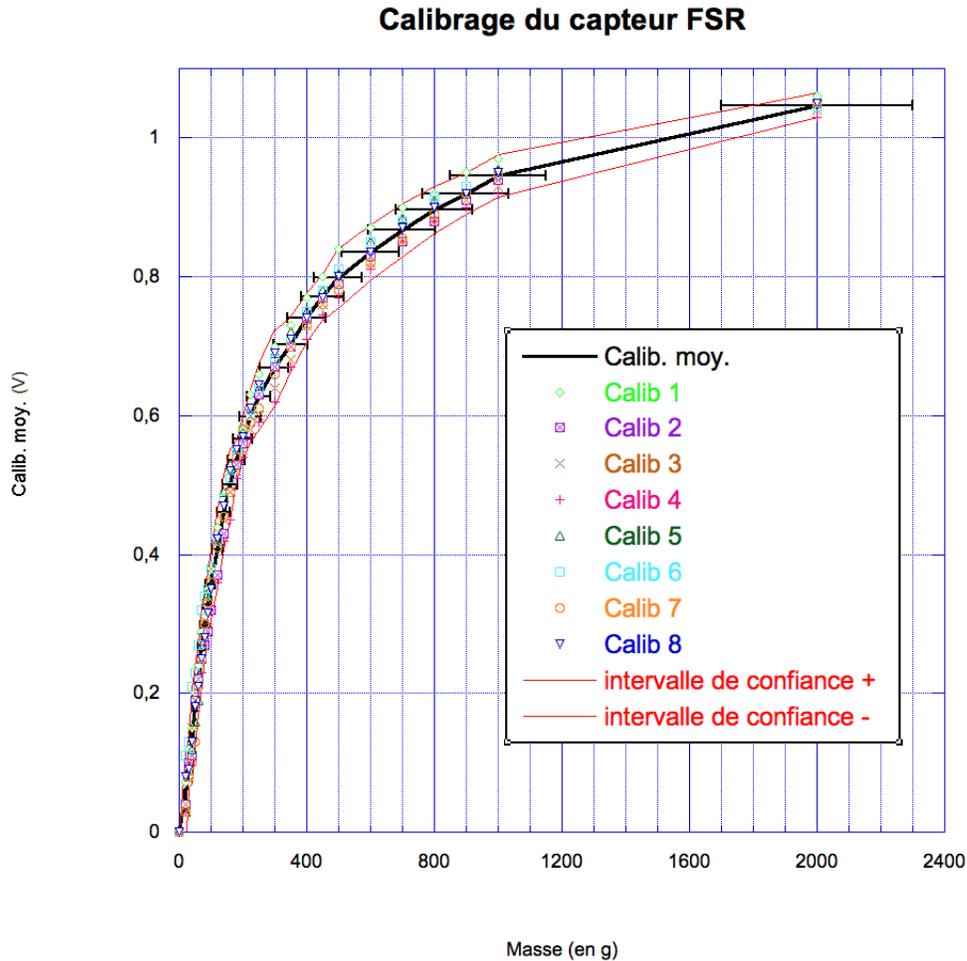


Figure 10 : Calibrage du capteur FSR

On remarque qu'en traçant des barres d'erreurs *horizontales* sur la courbe moyenne des calibrages, telles que :

$$V_{moy}(m - 10\%) < V_{moy}(m) < V_{moy}(m + 15\%) \quad (4)$$

où m désigne la masse, alors les 95% de l'intervalle de confiance sont respectés, et ce, dès qu'on dépasse 50g (Annexe B figure 1).

Ainsi, on utilisera pour nos mesures de force, cette courbe moyenne comme courbe de calibration du capteur, avec une incertitude (sur la masse mesurée) de -10% / +15%.

2.3 Chaîne de mesures

2.3.1 Les cartes d'acquisition

Aux origines du projet, nous comptions utiliser comme carte d'acquisition une Eobody [13], pilotée par Max/MSP. En effet, les capteurs tels que le FSR ont été à l'origine créés dans un but musical, et on utilise un FSR adapté pour l'Eobody. On avait donc adapté les capteurs et notre chaîne de mesures à cette carte d'acquisition, ainsi que créé un patch Max/MSP pour récupérer nos données (Annexe C). Cependant, lors de notre première session de mesure, on a constaté que l'on mesurait directement le signal audio, or l'Eobody n'est pas assez rapide pour acquérir de tels signaux. C'est pourquoi on a finalement décidé d'utiliser la carte National Instruments NI 9234. Cette carte ayant en entrée une limite en tension de $\pm 2V$, on a dû adapter les capteurs (rajouter les diviseurs de tension ad-hoc).

2.3.2 Problèmes de mesures des hautes impédances

Afin de mesurer les tensions V_1 et V_3 (voir figure 3) sans perturber le système, il a fallu ajouter une résistance de $10M\Omega$ en série sur nos câbles de mesures (la résistance du sac pouvant monter jusqu'à $1M\Omega$ [3]) (figure 11).

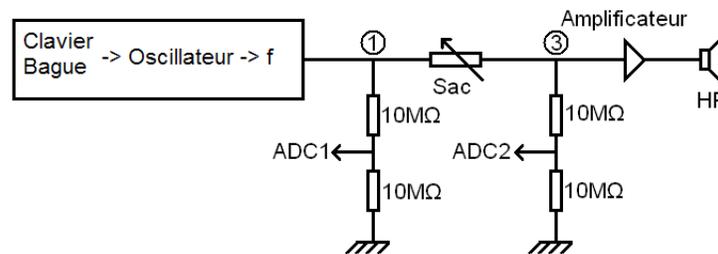


Figure 11 : Mesure des tensions au sein des Ondes Martenot

(sur ce schéma, ADC1 et ADC2 correspondent aux entrées de la carte d'acquisition) Cependant, compte-tenu de la résistance d'entrée de cette carte ($305\text{ k}\Omega$), on obtient un pont-diviseur de gain $0,03$ (ce qui nous a posé des problèmes pour les mesures des faibles tensions de quelques mV).

On a alors décidé de remplacer ces câbles par un circuit-suiveur (figure 12)

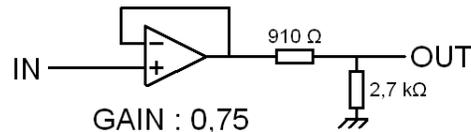


Figure 12 : Circuit suiveur, en IN la tension au point de mesure, en OUT la carte d'acquisition

On a calculé [15] que la résistance d'entrée de ce circuit valait $4.10^{11} \Omega$. Ainsi on peut mesurer exactement les tensions V_1 et V_3 sans perturber le système.

2.3.3 Microphones

Enfin, on cherche à mesurer l'intensité et la fréquence du son issu du diffuseur de l'instrument. Pour cela, on a eu besoin d'un microphone ayant une réponse plate sur toute la gamme de fréquences exploitée par les Ondes Martenot, de 35Hz à 4000Hz. On a alors utilisé un microphone Brüel & Kjaer Type 4191 [14], qui a une réponse plate sur 10Hz à 20kHz. Le microphone a été calibré à l'aide d'une source calibrée à 104 dB_{SPL} . On a ainsi pu recalculer ces dB pour avoir une valeur en dB absolu (et non en relatif). Le microphone est placé face au diffuseur de l'instrument, à 1m, et reste au même endroit pendant toutes les mesures (figure 13) :

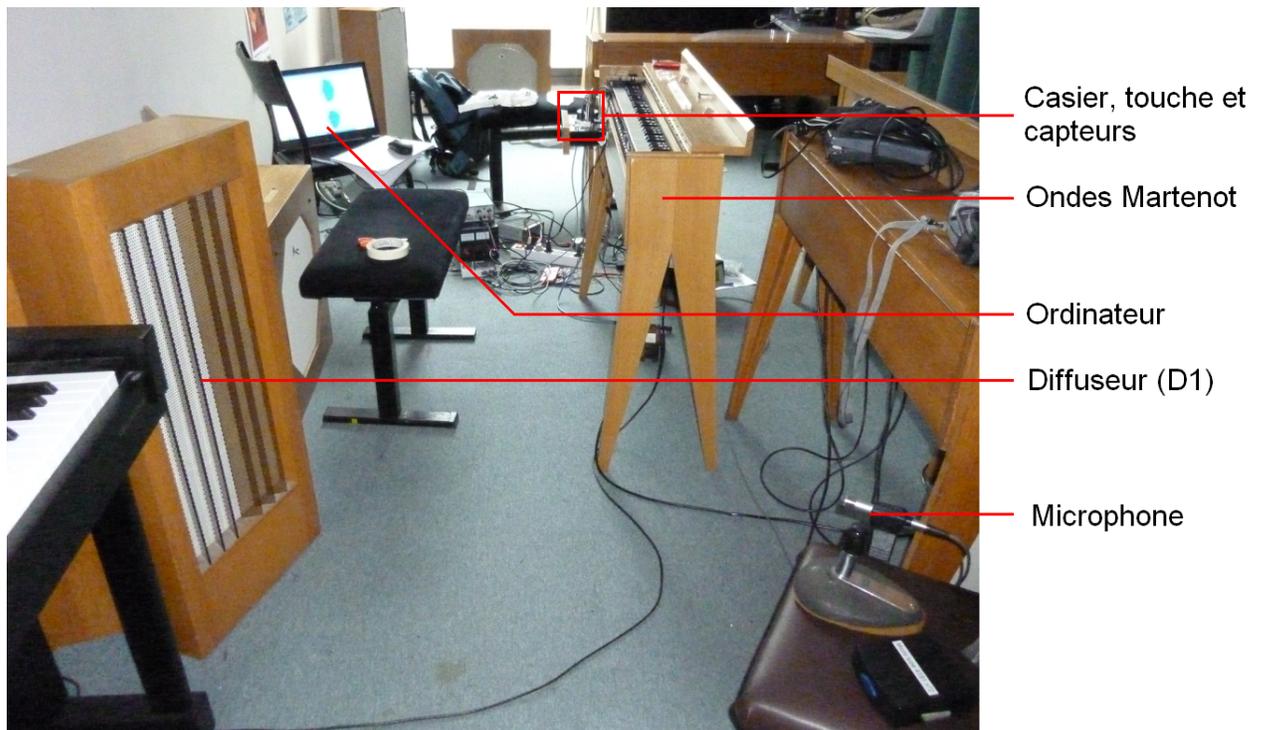


Figure 13 : Dispositif expérimental

3 Résultats

Avant toute chose, il est important de préciser que toutes les mesures ont été réalisées sur les Ondes Martenot n°320 (à transistors), dans la salle de cours du Conservatoire National Supérieur de Musique et de Danse de Paris (CNSMDP, [15]). Or toutes les Ondes sont différentes. On peut cependant espérer que nos résultats restent valables pour toutes les Ondes à transistors.

On décrira nos résultats selon les différents aspects de nos mesures : électrique, audio, mécanique, pour conclure sur un aspect plus global de l'instrument.

3.1 Aspect électrique

a) Sac seul

Des mesures en laboratoire sur le sac seul ont permis d'observer les temps de montée (capacité en série) et d'extinction (capacité en parallèle) de la tension (signal carré) le traversant. En posant :

$$\tau = RC \quad (5)$$

où R est la résistance, C la capacité et τ tel que le temps de montée $t_m = 5\tau$ et le temps d'extinction $t_e = 5\tau$, on peut définir les fréquences de coupure relatives à cette résistance.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (6)$$

On a mesuré un temps d'extinction maximal $t_e = 20\mu s$ quand la touche est relevée, soit $f_{c_e} = 40kHz$, et un temps de montée $t_m = 3\mu s$, soit $f_{c_m} = 265kHz$.

Comme l'instrument ne joue pas au delà de 4000Hz, on pourra assimiler le sac à une pure résistance variable.

b) Sac en fonctionnement

On va regarder le comportement de l'amplitude des tensions V_1 et V_3 (avant et après le sac) au cours du temps, lorsqu'on joue une note en appuyant sur la touche (dans cet exemple, figure 14, on appuie 2 fois de suite) :

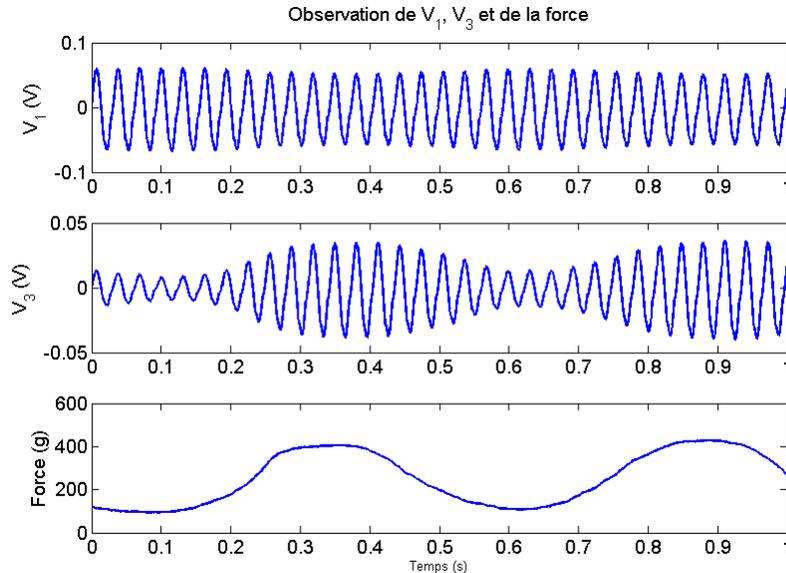


Figure 14 : Observation de V_1 , V_3 et la force appliquée sur la touche

On constate que :

- V_1 et V_3 sont des *signaux audio* (à la fréquence de la note jouée, ici un Do1 à 32Hz) ;
 - seule l'amplitude de V_3 est modulée, en fonction de la force appliquée à la touche
- Désormais, pour simplifier le problème,
- on choisit de ne jouer à l'instrument que des sons sinusoïdaux
 - on se contentera de ne regarder que l'enveloppe des tensions (puisque ce sont des sinusoides à la fréquence jouée)

Dans tout le paragraphe 3.1, pour éviter d'avoir à considérer l'aspect "mécanique" de la touche (force et enfoncement), on fait des séries de mesures en remplaçant le sac par des résistances connues (qu'on fait varier de 10 M Ω à quelques Ω , pour parcourir toute la plage des valeurs de résistances du sac).

c) La tension V_1

On réalise des séries de sweeps (glissendi sur 6 octaves, à la bague) pour couvrir toute la gamme des fréquences jouées aux Ondes, et ce pour différentes valeurs de résistances R.

On s'aperçoit que l'enveloppe de V_1 varie avec la fréquence f , mais ne dépend pas de R (voir annexe B, figure 2). Ainsi V_1 est de la forme :

$$V_1 = POND(f) \quad (7)$$

où $POND(f)$ représente la pondération en fréquences appliquée à l'amplitude de V_1 (figure 15) :

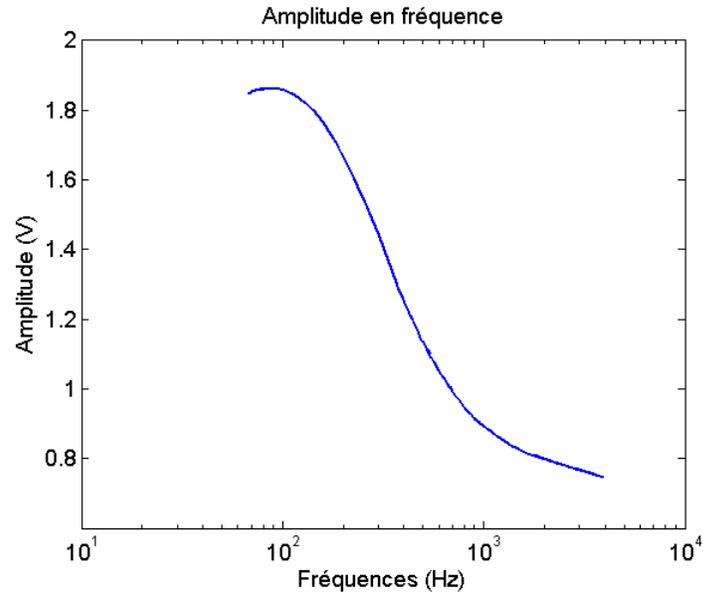


Figure 15 : Pondération en fréquence appliquée sur V_1

Cette pondération, qui permet de donner plus d'énergie aux fréquences graves, sert vraisemblablement à compenser la faible réponse du haut-parleur aux basses fréquences.

d) La tension V_3

On s'intéresse à la variation de V_3 avec la fréquence et l'enfoncement. En reprenant l'expérience précédente (série de sweeps à la bague, en changeant à chaque fois la résistance R), on obtient (figure 16) :

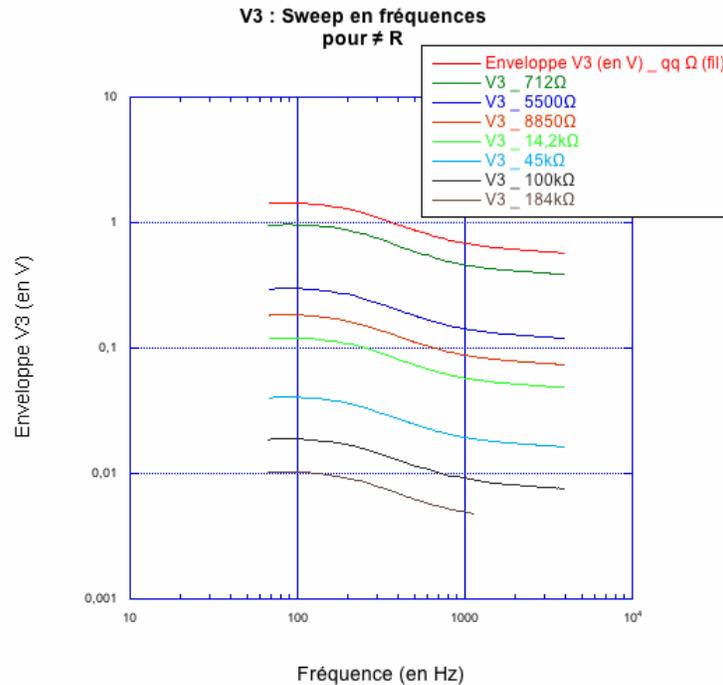


Figure 16 : Evolution de V_3 avec la résistance et la fréquence

On s'aperçoit que la forme de V_3 (en $\log(f)$) ne change pas avec R; qui plus est, on reconnaît, dans le cas où R vaut quelques Ω (le sac est shunté par un fil), la courbe $Pond(f)$. Ainsi V_3 peut se mettre sous la forme :

$$V_3(R, f) = \alpha(R).Pond(f) \quad (8)$$

On tire des courbes précédentes, les valeurs de la fonction $\alpha(R)$ (Annexe B figure 10). On constate que le gain $\alpha(R)$, une fois passé en log (donc dans le domaine de la perception), diminue linéairement avec $\log(R)$, et sature pour les faibles valeurs de R.

3.2 Aspect audio

Pour toutes nos mesures, on a placé le microphone à 1m du diffuseur de l'instrument.

a) Calcul des dB_{SPL}

Dans la mesure où les sinusoïdes générées par les Ondes Martenot ne sont pas parfaites (offset de 10% environ), on a préféré utiliser une définition générale des dB (plutôt que d'utiliser un calcul avec les valeurs efficaces) :

$$dB(t) = 10 \log \left(\int_{T=50ms} \frac{P(t)^2}{P_0} dt \right) \quad (9)$$

où P désigne la pression acoustique.

Comme on acquiert des signaux discrets, et qu'on va travailler en dB relatif (on peut se permettre d'ignorer P_0), la formule devient :

$$dB(t) = 10 \log \left(\frac{1}{N} \sum_1^N x^2(t) \right) \quad (10)$$

où N désigne le nombre de points dans la fenêtre de 50ms et x(t) le signal électrique issu du microphone.

Remarque : à l'issue de ce calcul, on recale toutes nos courbes à partir d'une mesure de son calibré, pour bien avoir finalement des dB absolus.

b) Variation avec la fréquence de la note

On cherche à voir si l'on retrouve trace de la pondération en fréquence (cf 3.1.c) dans l'intensité sonore, et plus généralement, comment le signal sonore varie avec la résistance R du sac. On obtient la courbe suivante (figure 17) :

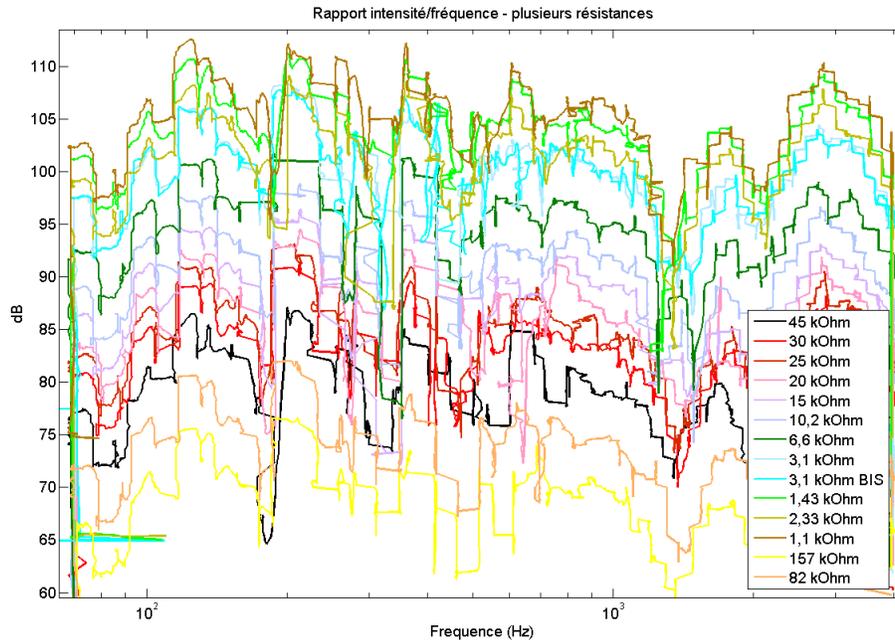


Figure 17 : Intensité en fréquence pour différentes résistances

On constate que, quelle que soit la résistance, les courbes ont la même forme (et que l'intensité est d'autant plus forte que la résistance est faible).

Par contre, la forme de cette nouvelle courbe de pondération avec la fréquence, ne correspond pas avec celle du paragraphe 3.1 ; elle est beaucoup plus compliquée : l'intensité sonore change avec chaque note (voir Annexe B, figure 4).

Un musicien professionnel des Ondes Martenot nous a confirmé ce phénomène, expliquant que certaines notes "sortent" mieux que d'autres, et que ce phénomène apparaissait de façon différente selon l'instrument. Un début d'explication pourrait être que le diffuseur a ses propres modes qui accentuent certaines notes plus que d'autres. Ensuite, nos mesures ont été réalisées dans une salle non-anéchoïque. Ainsi, les notes accentuées pourraient faire parties des modes de la salle dans laquelle ces mesures ont été faites.

c) Variation avec le geste du musicien

On va regarder, pour une note fixée, comment varie l'intensité sonore, avec l'enfoncement de la touche (qui écrase le sac) (figure 18).

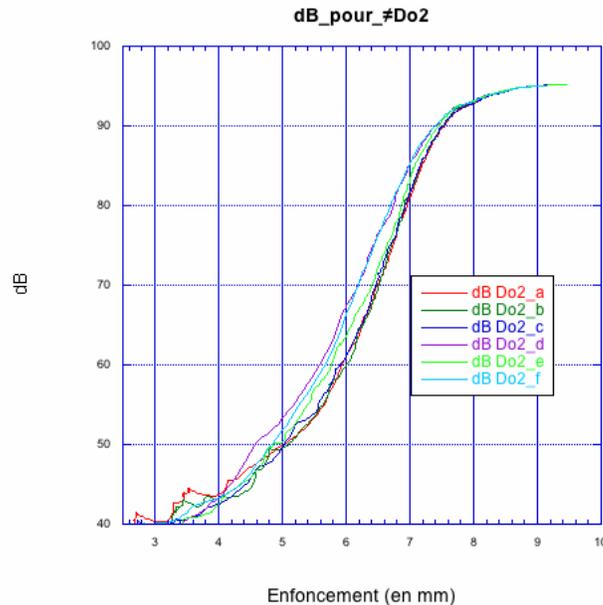


Figure 18 : Variation de l'intensité sonore en fonction de l'enfoncement

On obtient toujours la même courbe (et ce qu'on appuie plus ou moins vite sur la touche). Ainsi le musicien contrôle de façon parfaitement reproductible le niveau sonore de chaque note (voir Annexe B, figure 9, la courbe pour 19 notes différentes).

d) Effet du vieillissement

On a remarqué que le niveau sonore chutait brutalement dès qu'on relève la touche (Annexe B, figure 5). Ceci est sans doute dû au vieillissement de la poudre et du sac de cuir (perte d'élasticité). Aux dires des Ondistes, le fonctionnement "idéal" du sac est réversible, et on devrait obtenir le même volume sonore selon qu'on enfonce ou qu'on relâche la touche.

3.3 Modélisation du comportement électro-acoustique

Pour simuler le comportement audio de l'instrument, on a besoin de préciser la courbe précédente pour piloter la "réponse audio" du dispositif haptique. Pour se faire :

- on va préférer partir de V_3 (plutôt que du signal issu du microphone) en utilisant la notion de "dB électrique"

- on cherchera à exprimer V_3 en fonction de la résistance R du sac, sachant qu'on sait déjà ([3]) que $\log(R)$ varie linéairement avec l'enfoncement

a) Les dB électriques

On définit les dB électriques à partir de V_3 comme suit ([18]) :

$$dB_{elec}(V_3) = 20 \cdot \log\left(\frac{V_3}{V_{ref}}\right) \quad (11)$$

avec $V_{ref}=1V$

Remarque : historiquement, la notion de dB électrique correspond à l'indication fournie par les VU-mètres sur les consoles audio.

Puisque les signaux qu'on utilise sont des sinusoïdes, le lien entre dB_{SPL} et dB_{elec} est facile à établir (figure 19) :

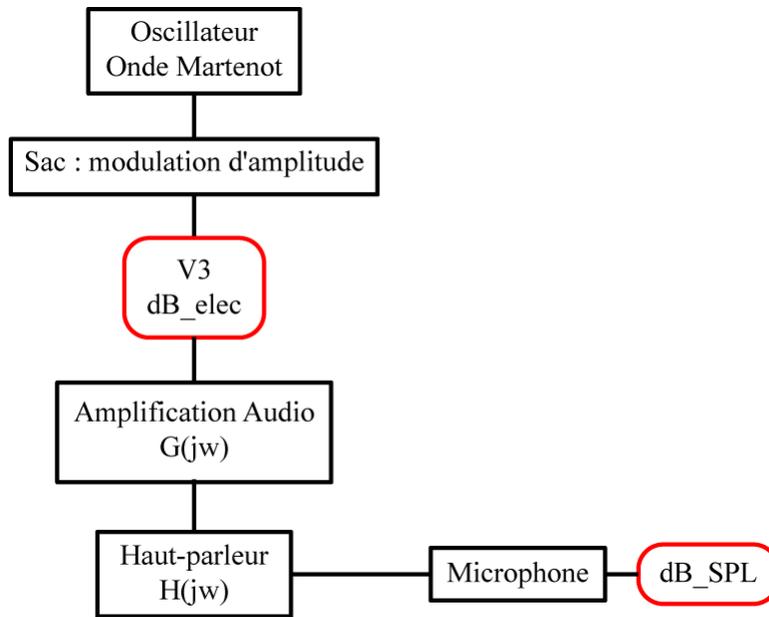


Figure 19 : Lien entre dB_{SPL} et dB_{elec}

Pour une note fixée, $V_3(t)$ n'a qu'une composante fréquentielle (à la fréquence ω_0). Par conséquent, le signal $20 \cdot \log(V_3(t))$ va être successivement transformé par :

- la partie *Amplification Audio*, qui rajoute une constante (la valeur du gain en ω_0)
- la partie *Haut-parleur*, qui ajoute une constante (la réponse du H.P. à ω_0)
- la *propagation dans l'air* jusqu'au microphone, (aussi une constante, puisqu'on ne change pas l'emplacement du micro)
- le *microphone*, qui rajoute une constante (la sensibilité du micro à la fréquence ω_0)

Aussi, les signaux $20.\log(V_3(t))$ et $dB_{SPL}(t)$ sont les mêmes, à une constante près (pour plus de détails, voir Annexe B, figures 2 et 3).

En pratique, on utilisera les informations fournies par $20.\log(V_3(t))$, qui sont plus précises pour les faibles niveaux sonores, en les recalant à partir du signal du microphone, pour avoir des dB absolus.

b) Variation de $20.\log(V_3)$ avec la résistance R

On s'est intéressé à la variation de V_3 avec la résistance R (figure 20)

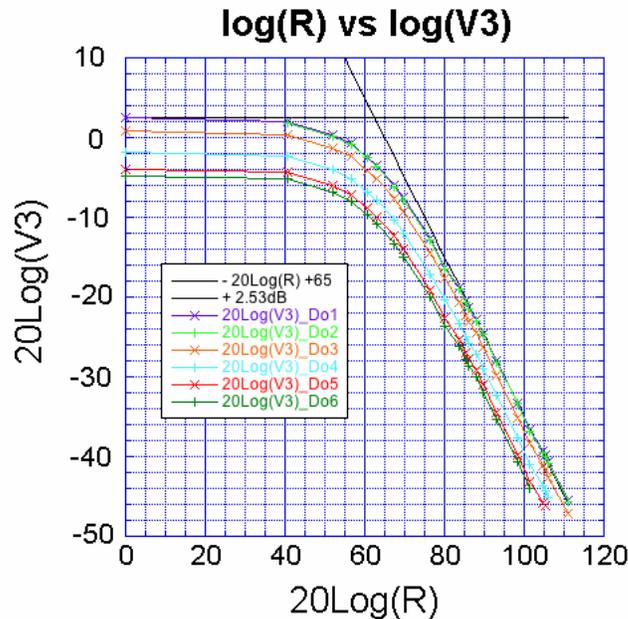


Figure 20 : $\log(R)$ vs $\log(V_3)$

On reconnaît le profil du diagramme de Bode d'une fonction de transfert au premier ordre (à cela près qu'ici, on n'a pas ω en abscisse, mais R!).

Aussi V_3 peut se mettre sous la forme :

$$V_3 = \frac{V_{max}}{1 + \frac{R}{R_0}} \quad (12)$$

Ceci nous a fourni un premier fit, en prenant $V_{max}=1,31V$ et $R_0=1850\Omega$.

c) Variation de $\log(R)$ avec l'enfoncement

On vérifie bien que $\log(R)$ varie linéairement avec l'enfoncement (figure 21) :

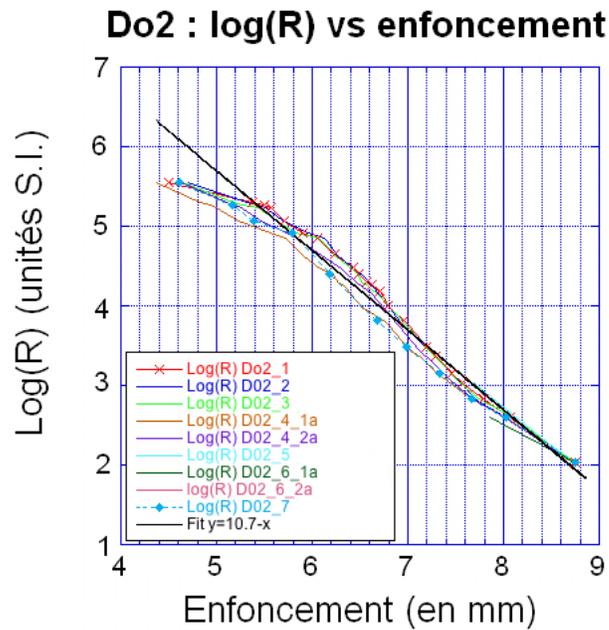


Figure 21 : $\log(R)$ vs enfouissement

d) Détermination du fit de $20.\log(V_3)$ avec l'enfouissement

En combinant l'équation de la droite du c) avec le fit de b), on obtient la variation de V_3 avec l'enfouissement (figure 22) :

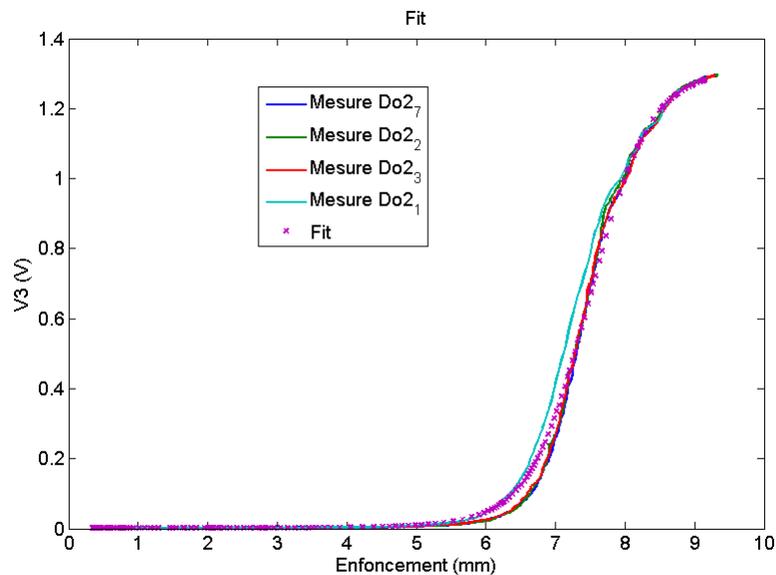


Figure 22 : comparaison entre les courbes V_3 (enfouissement) mesurées et celle modélisée

Cependant, une fois passé en dB électriques, on s'aperçoit que le fit "ne colle pas" si bien que ça pour les petites valeurs de V_3 (figure 23) :

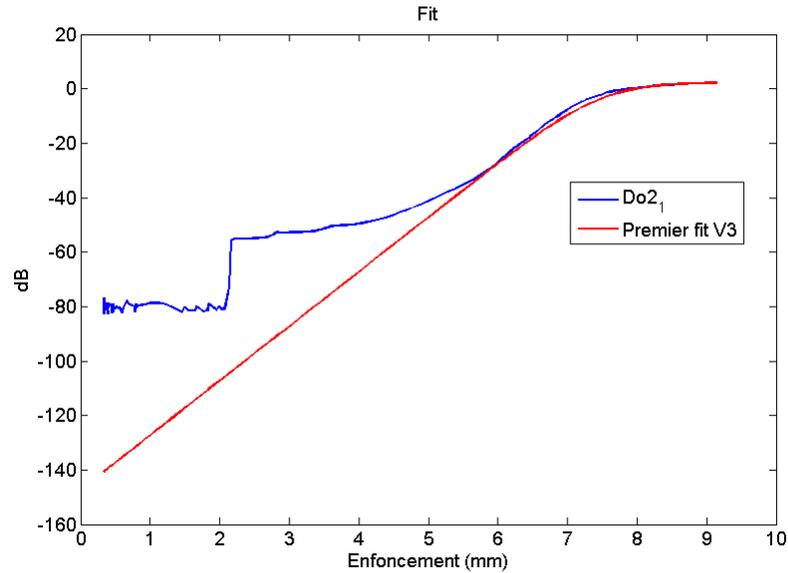


Figure 23 : Fit de V_3 en fonction de l'enfoncement

Aussi, on raffine le modèle en fittant la mesure par la combinaison d'une droite horizontale, d'une parabole et de (12) (figure 24) :

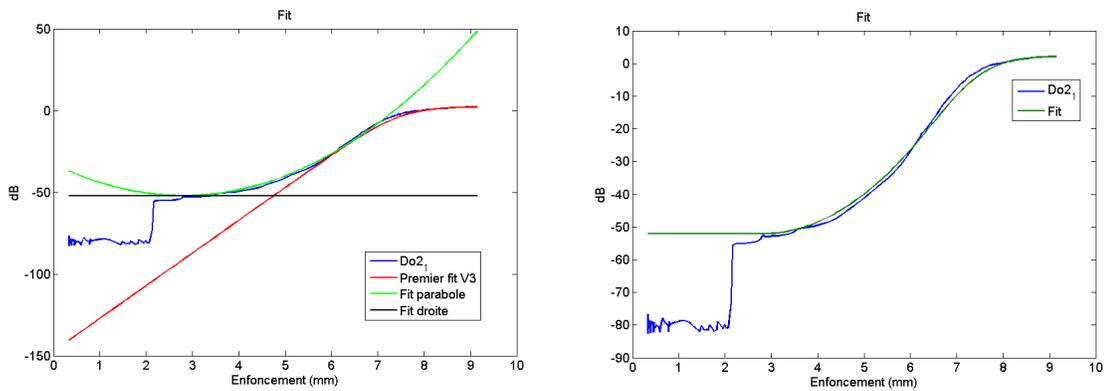


Figure 24 : Fit de V_3 en fonction de l'enfoncement

Avec ce dernier modèle, on calcule un écart moyen aux mesures de $-0,3\text{dB}$ au delà de $2,8\text{mm}$ d'enfoncement : on a donc un "bon" fit qui permettra la simulation avec notre dispositif à retour d'effort.

3.4 Aspect Mécanique

Force Vs Enfoncement

L'un des aspects les plus importants de notre étude porte sur le ressenti au bout du doigt du musicien. On a donc mesuré la force appliquée par le doigt sur la touche d'expression en fonction de son enfoncement lors du jeu (figure 25) :

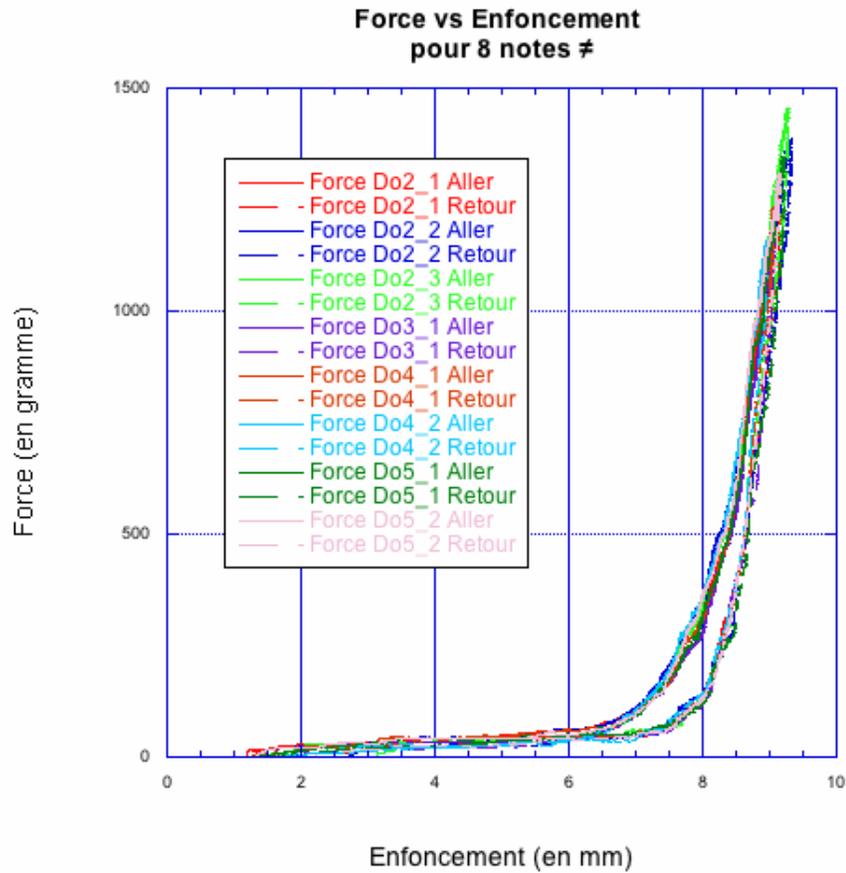


Figure 25 : Force vs Enfoncement - Aller et retour

Ces courbes ont été réalisées en appuyant lentement et en tentant de parcourir tout le jeu de la touche. On constate que la mesure est tout à fait reproductible (annexe D figure 6). Par ailleurs l'hystérésis, de 1mm au plus fort, est assez petite. On décide de l'ignorer par la suite, et de se concentrer sur la touche en enfoncement, sans le retour (figure 26) :

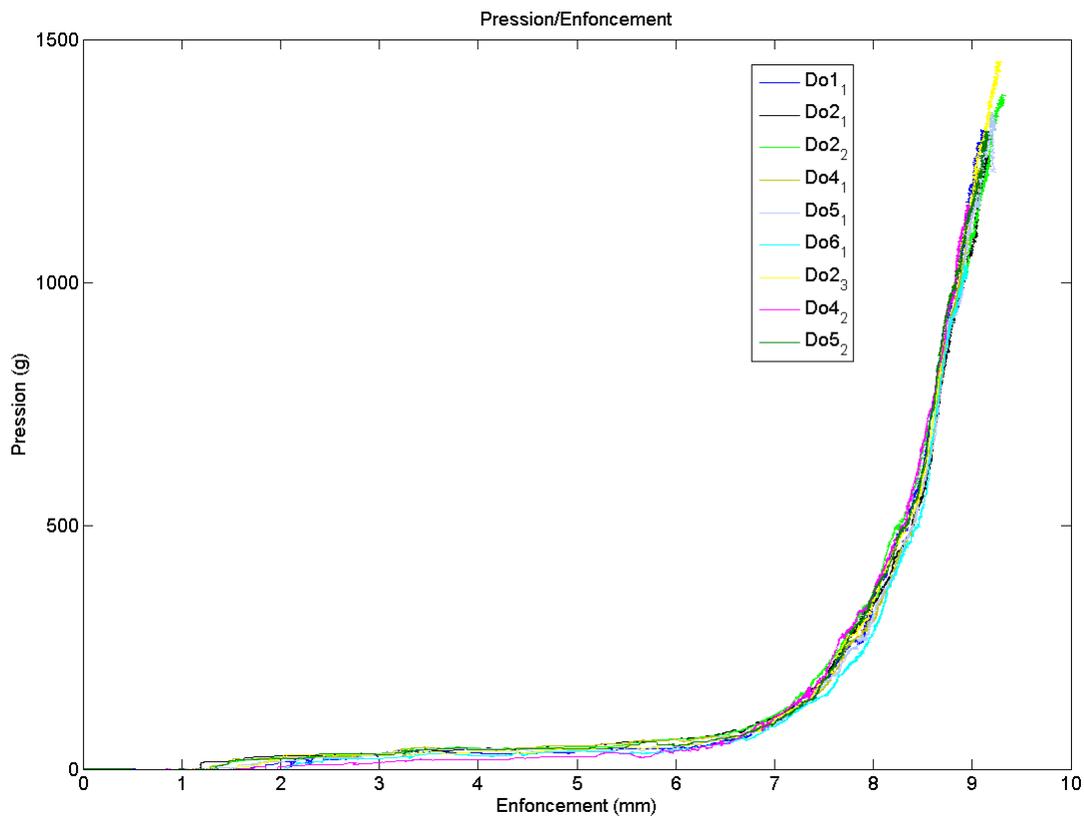


Figure 26 : Force vs Enfoncement - Aller

Ainsi on obtient toujours la même courbe quelle que soit la note jouée : force et enfoncement sont totalement corrélés.

Fit de la courbe

On peut distinguer 3 phases dans la courbe "Force vs Enfoncement" : une droite en début de course (jusqu'à 5mm), une droite en fin de course (à partir de 8,5mm) et un raccord en loi de puissance (figure 27) :

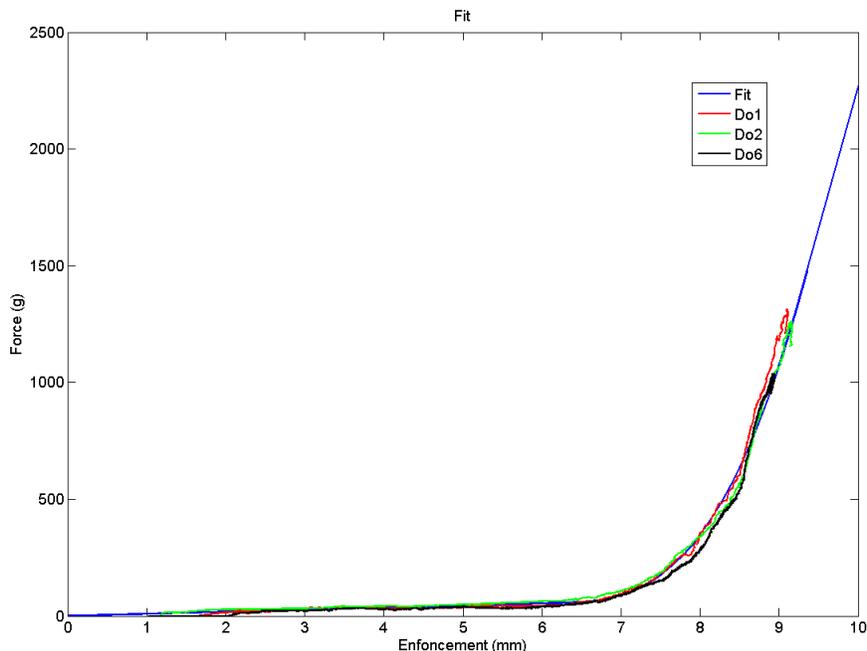


Figure 27 : Fit des courbes expérimentales de Force vs Enfoncement

On vérifie que l'ensemble de nos courbes expérimentales (Force vs Enfoncement) sont bien fittées par ce modèle (Annexe B, figures 7 et 8).

On proposera (partie 4) un modèle mécanique de la touche, pour rendre compte de la réalité via des lois de comportement .

3.5 Aspects globaux

On a vu que la touche d'expression des Ondes Martenot est un transducteur convertissant, de manière reproductible, le geste musical (mécanique) en son.

On peut en illustrer le détail à partir des mesures obtenues, lorsqu'on joue une note en parcourant toute l'étendue du niveau sonore (figures 28 à 31).

a) Les dB et les nuances de jeu

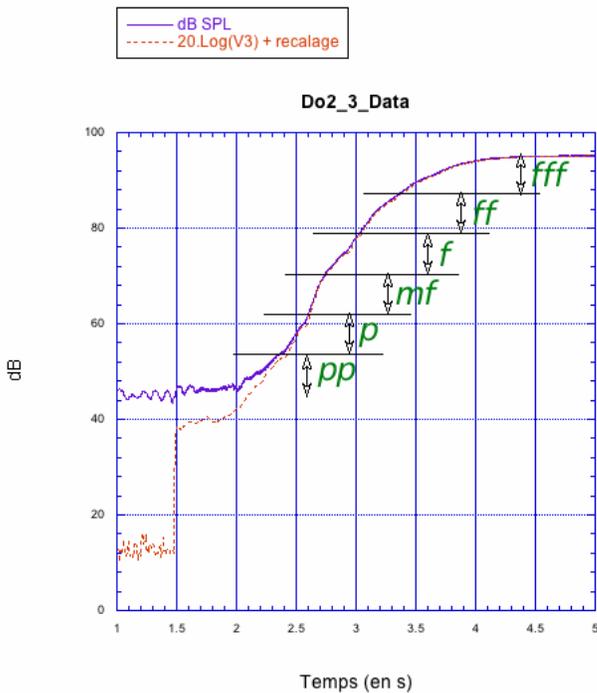


Figure 28 : $20.\log(V_3(t))$ et $dB_{SPL}(t)$

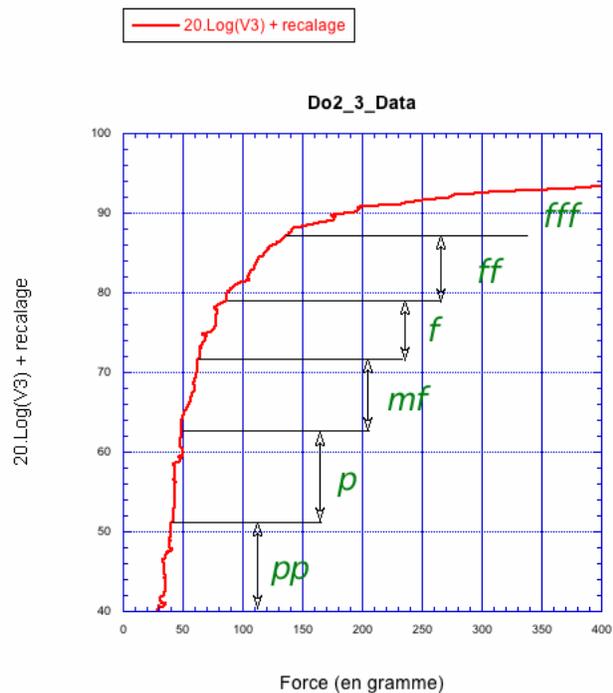


Figure 29 : dB vs Force pour la même expérience

Plusieurs choses sont observables (figure 28) :

1) $t = 1,5s$

Sur la courbe $20\log(V_3)$, le saut d'amplitude correspond à l'instant du déclipsage (cf paragraphe 2.2.1).

2) $t = 2,5s$

A partir de cet instant, les 2 courbes contiennent la même information ; il s'agit de dB absolu car on a recalé la courbe $20.\log(V_3)$.

3) Les nuances de niveau sonore

Puisqu'on couvre toute l'étendue du niveau sonore, on a rajouté sur les courbes les zones de nuance, de pianissimo à triple forte, en divisant la courbe en 6 parties égales. Ceci va nous permettre de préciser les plages de chaque paramètre (force, enfoncement et résistance du sac)...étant entendu qu'il s'agit d'indications "floues" (le partage net entre chaque nuance n'est pas à prendre au pied de la lettre).

Le point principal, c'est que cet instrument dispose d'une dynamique exceptionnelle (presque 50 dB) .

b) Courbe dB versus Force

A partir des courbes dB(t) et Force(t) de la même expérience, on construit la courbe dB(force), en rajoutant les nuances (en utilisant l'instant d'apparition de ces nuances)(figure 29).

Le point principal, c'est qu'au début de la courbe, une faible variation de la force appliquée sur la touche entraîne une augmentation très rapide des dB. C'est ce qui va permettre au musicien le jeu "percussif", et plus généralement, d'obtenir des attaques bien nettes.

Par contre, cela oblige le musicien à doser très finement la force qu'il applique.

c) Courbe dB versus Enfoncement

On l'obtient de la même manière que la courbe précédente (figure 30).

Le point principal, c'est que la courbe démarre relativement doucement. C'est ce qui va permettre au musicien de pouvoir doser finement "l'émergence" du son à partir du silence.

Par contre, la maîtrise des Ondes Martenot requiert beaucoup de subtilités, puisque l'essentiel du jeu se passe finalement sur une variation d'enfoncement de 3mm (de 4 à 7mm).

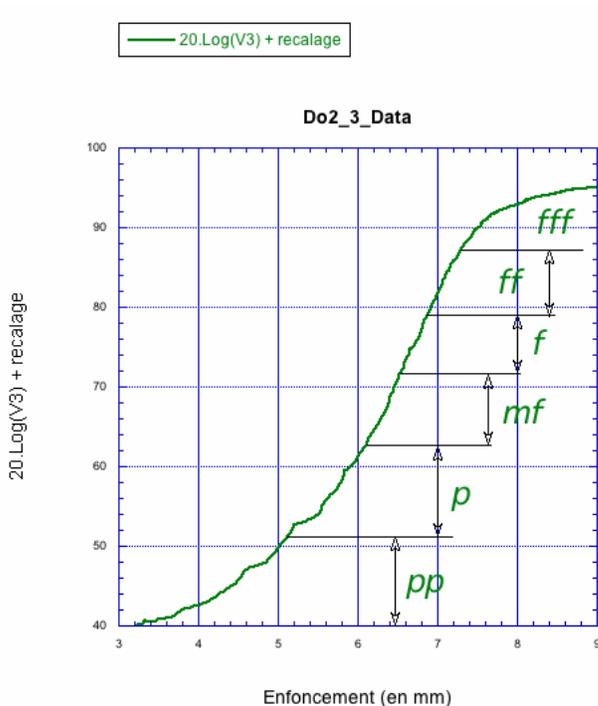


Figure 30 : dB vs Enfoncement pour la même expérience

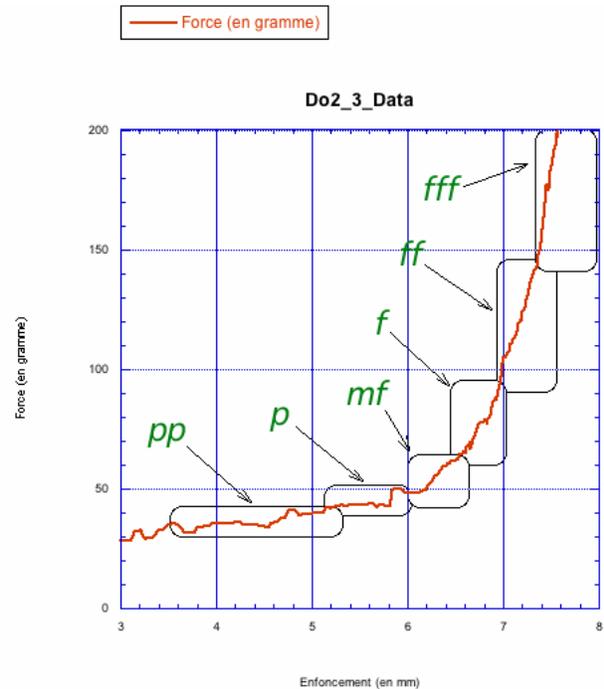


Figure 31 : Courbe « Force vs Enfoncement » pour cette même expérience

d) Courbe dB versus R

On retrouve le même genre de résultat que celui obtenu en [3] (Annexe B figure 12), alors qu'il avait procédé de façon très différente (un professionnel jouait une certaine nuance, et on figeait la touche pour mesurer sa résistance). Ceci valide à posteriori nos choix de nuances du paragraphe a).

e) Contrôle du geste par le musicien

En combinant les courbes précédentes, on obtient les zones des nuances de jeu, sur la courbe "force vs Enfoncement", qui traduit le ressenti du musicien (figure 31)

Au vu de cette courbe, on ne peut pas dire qu'on contrôle l'instrument en force ou en enfoncement (en plus de l'oreille), mais plutôt en force et en enfoncement : c'est sans doute l'enfoncement qui prime à faible niveau sonore, et la force (la "réponse mécanique" de la touche) pour les plus forts niveaux.

f) Détermination du "temps de réaction" de la touche

On cherche à déterminer la rapidité avec laquelle cette touche transforme le geste du musicien en son. Pour l'estimer, on observe simultanément les variations de l'enfoncement au cours du temps et ses répercussions sur V_3 , dans le cas d'une note jouée extrêmement rapidement (mode percussif) (Annexe B figure 11). On mesure un temps de réaction de 2ms. L'instrument réagit donc instantanément.

4 Modélisation mécanique de la touche d'expression

Suite aux mesures de forces et enfoncements qui ont été réalisées sur la touche d'expression des Ondes Martenot, on a décidé d'étudier son comportement pour tenter de le modéliser mécaniquement.

On repère ainsi 3 phases :

- de 0 à 5mm d'enfoncement, on a une droite, on appuie simplement sur la touche (v_A)
- de 8,5 à 9,5mm d'enfoncement, on a une droite. On fait l'hypothèse qu'en cet endroit, quand on appuie sur la touche, la poudre est tassée et fait office d'appui (v_B)
- de 5 à 8,5mm d'enfoncement, on observe un raccord, c'est le moment où le sac s'écrase, où la poudre commence à se tasser (v_C)

Ces différentes phases peuvent être modélisées par des systèmes mécaniques simples. Notre modèle prendra en compte la variation de section de la poutre la constituant (voir annexe E). Le modèle se terminera donc par l'étude de ce raccord. Enfin, on vérifiera nos résultats expérimentalement à l'aide d'un fac-similé de touche. On trouvera les différentes valeurs numériques en annexe G.

4.1 Modèle

4.1.1 Poutre encastrée-libre

Dans un premier temps, sur 0-6mm d'enfoncement, notre système est modélisable par une simple poutre encastrée-libre (figure 32) :

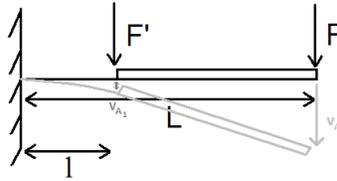


Figure 32 : Poutre encastrée-libre

On considère la force F' , telle que $F' = \frac{l}{L}F$, où F' est la force appliquée à la fin de la partie non rigide. On peut calculer la flèche de cette partie en la traitant comme une simple poutre encastrée-libre de longueur l , en résolvant le problème élastique correspondant [19, 20] :

$$v_{A_1} = \frac{F'l^3}{3EI} = \frac{FLl^2}{3EI} \quad (13)$$

où v_{A_1} est la flèche de la partie déformable de la poutre, on trouve alors v_A la flèche de la poutre totale grâce à la pente au bout de la partie déformée telle que $v_A = \text{pente} \times L$, F la force appliquée, L la longueur de la poutre entière, E le module d'Young et I le moment cinétique défini par :

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (14)$$

où b est la largeur de la poutre et h son épaisseur.

On calcule ensuite la pente entre l'encastrement et le début de la partie rigide, ceci pour chaque effort. On peut alors, en connaissant la longueur de la partie rigide, déterminer la flèche de celle-ci.

On reporte tous les résultats sur une figure récapitulative en fin de partie (figure 37).

4.1.2 Poutre encastree-appui-libre

Nous considérons la troisième partie, sur 8,5-9,5mm d'enfoncement. On voit maintenant le système comme en figure 33 :

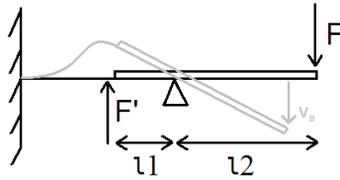


Figure 33 : Poutre encastree-appui-libre

On se concentre sur la force F' , sachant que :

$$F' = \frac{l_2}{l_1} F \quad (15)$$

Pour la calculer, on se place dans le cas d'une poutre bi-encastree (figure 34), en faisant l'approximation d'une tangente nulle dans le système réel au sommet de la déformation.

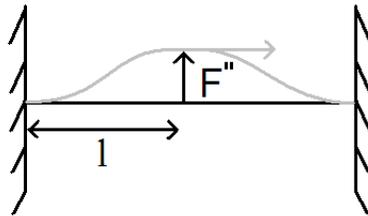


Figure 34 : Poutre bi-encastree

On calcule alors la flèche [21] :

$$v_{B_1} = \frac{5F''(2l)^4}{384EI} \quad (16)$$

A partir de la flèche calculée, on peut déterminer celle de la poutre entière à l'aide d'une simple règle de 3 (figure 35) telle que $v_B = c = \frac{bc}{d}$ où $b = v_{B_1}$.

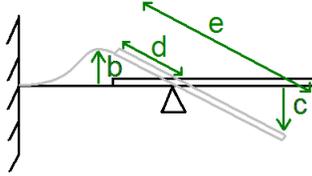


Figure 35 : Poutre encadrée-appui-libre

On reporte tous les résultats sur une figure récapitulative en fin de partie (figure 37).

4.1.3 Raccord

Pour l'étude du raccord, on propose d'utiliser le contact de Hertz. Le contact de Hertz est "une description [...] de la contrainte au sein de deux objets en contact" [22]. On considèrera ici le contact entre une sphère déformable (le sac) et une surface indéformable (la touche) (Figure 36) :

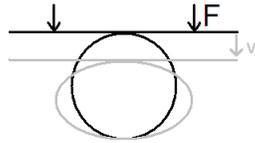


Figure 36 : Contact de Hertz

On tire de [22] l'expression de la flèche v_C :

$$v_C = \left(\frac{3F}{4E^* R^{1/2}} \right)^{2/3} \quad (17)$$

où F la force appliquée, E^* le module d'Young normalisé par le coefficient de Poisson tel que $E^* = \frac{E}{1-\nu^2}$ où ν est le coefficient de Poisson, R le rayon de la sphère.

Cette formule s'applique à une sphère pleine. Or, dans notre cas, la sphère est partiellement creuse et contient de la poudre, ce n'est donc pas une sphère de cuir pleine. On a donc choisi un module d'Young arbitrairement bas, afin d'assurer un meilleur raccord entre v_A et v_B .

On obtient alors le résultat suivant (figure 37) :

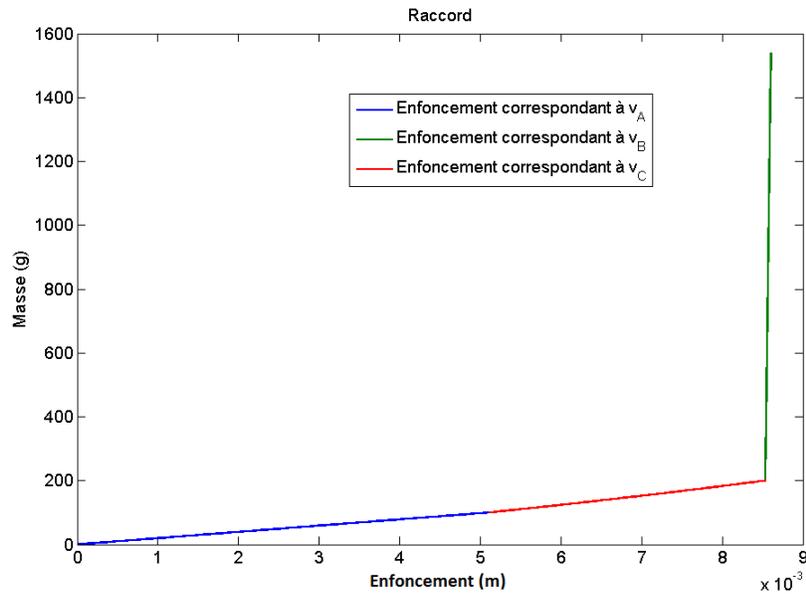


Figure 37 : Modélisation du raccord par contact de Hertz

On observe ici des valeurs et des pentes proches de l'expérience, bien que le raccord soit un peu rude à 8,5mm d'enfoncement. Ce modèle se rapproche bien de l'expérience, et constitue une bonne représentation de notre système, bien qu'en 0mm la pente ne soit pas nulle.

4.2 Vérification expérimentale

On cherche à vérifier si l'on peut n'obtenir que les 2 droites à l'aide d'un fac-similé de touche, sans sac, mais avec un appui placé à l'endroit du sac. Cet appui n'est pas en contact avec la touche au début de l'expérience, pour pouvoir s'enfoncer en configuration "poutre encastree-libre" avant de passer à "poutre encastree-appui-libre" (figure 38).

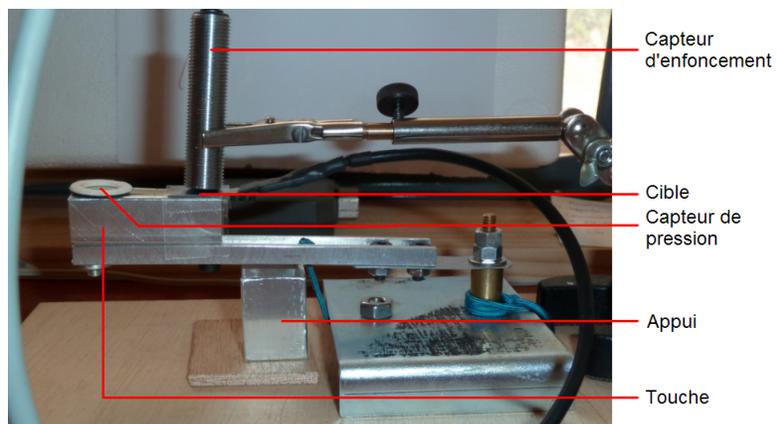


Figure 38 : Fac-similé de touche d'expression d'Ondes Martenot

On peut alors observer les 2 droites recherchées (figure 39). Outre la répétabilité de l'expérience, on remarque que les pentes sont plus proches de celles calculées que de celles mesurées. Ceci est dû au fait que l'appui soit fixe et rigide (contrairement au sac sur lequel on continue à appuyer), ce qui permet d'éviter la phase correspondant au sac. En comparant avec le fit établi précédemment, on peut voir l'influence du sac sur le ressenti du musicien.

Ceci constitue donc une validation de notre modèle.

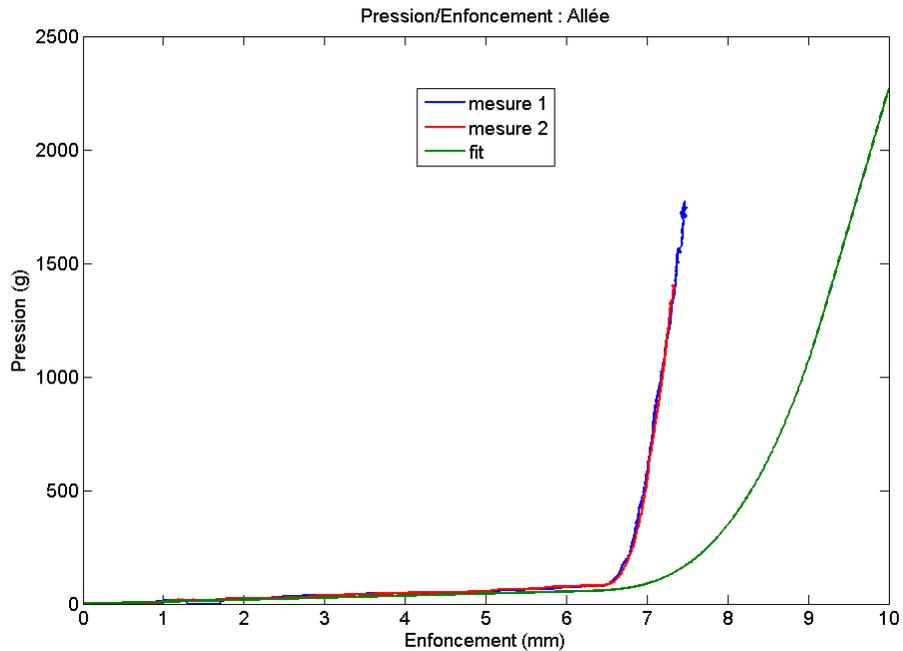


Figure 39 : Pression vs Enfoncement sur le fac-similé - 3 essais

4.3 Conclusion

On a monté un modèle théorique de poutre à deux sections, dont l'une rigide, avec contact de Hertz. Ce modèle, dans le cas d'une étude sans expérience, constitue une très bonne représentation de notre système.

5 Simulation de la touche par un système haptique à retour d'effort

5.1 Tour d'horizon et choix de notre système

L'histoire des systèmes haptiques (du grec *aptomai*, "je touche") à retour d'effort trouve ses origines dans les années 1950 aux Etats-Unis. Il était question de pouvoir manipuler à distance des substances radioactives. Depuis, ces mécanismes ont été utilisés dans les sous-marins, la chirurgie, les simulateurs de vol, les jeux vidéos, etc...

Pour ce qui est de la musique, bien des travaux ont été effectués sur les systèmes à retour d'effort ces dernières années [23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30]. On peut citer en particulier ([29]) :

- l'ERGOS de l'ACROE [26], un outil très complet usant des six degrés de liberté possibles (3 degrés de déplacement (x, y et z) et 3 degrés de torsion)
- le Touchback Keyboard de Gillespie [31], un système émulant le toucher d'un piano à queue
- le Nichols' vBow de Nichols [32], utilisé pour simuler l'archet d'un violon

La course à la nouveauté dans le jeu vidéo a permis un développement assez important des dispositifs haptiques à retour d'effort produits en masse et donc de relativement bas prix, de sorte à pouvoir être achetés par des particuliers. Il existe un grand nombre de joystick type "manche à balais" avec deux degrés de liberté en déplacement, mais également quelques joysticks à 3 voire 6 degrés de liberté.

On peut citer en particulier le *Falcon*[©] de Novint (figure 40, [33]), également cité dans [29]. Ses caractéristiques sont les suivantes [34] :

- 3 degrés de liberté en déplacement (x, y et z), avec trois bras motorisés permettant l'application de force en trois dimensions
- application de forces supérieures à 2 livres, soit environ 900g
- déplacements dans les 3 dimensions de 4 pouces, soit environ 10cm
- résolution sur la position de 400dpi, 1 point tous les 64 μ m

Le *Falcon* est un joystick initialement conçu pour le jeu vidéo, la force maximale qu'il applique a donc de fortes chances d'être trop faible pour notre application (en effet, on cherche des forces de l'ordre de 2kg). On va alors utiliser un bras de levier "×3", car on n'utilisera qu'une petite partie du déplacement utilisable : la touche ne s'enfonçant que d'1cm, on utiliserait 3cm de déplacement pour le joystick, et on pourra exercer jusqu'à 3kg de force (figure 41, plans en Annexe F). On notera que ce joystick ne coûte que 180€, soit environ 10 fois moins que la plupart des autres dispositifs du même genre. On a donc choisi d'utiliser ce joystick.

On a découvert par la suite qu'il était possible de communiquer avec ce joystick via Matlab [35, 36]. Par ailleurs, ce joystick a déjà servi à quelques expériences musicales [37].



Figure 40 : Novint Falcon[©]

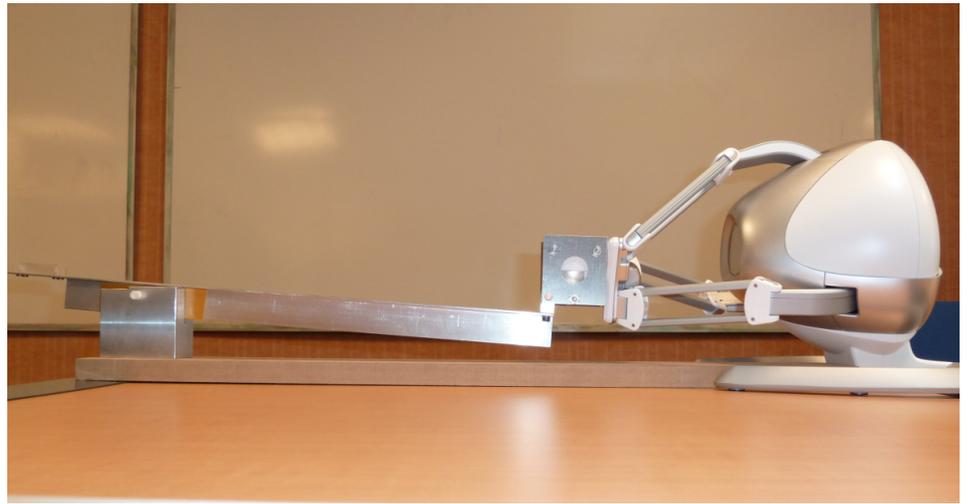


Figure 41 : Falcon équipé

5.2 Falcon : calibrage et tests

Précisions sur les caractéristiques

Les références trouvées en [34] manquent de précision, il a donc fallu calibrer le joystick.

- on a mesuré au réglet des déplacements jusqu'à 11cm
- on a mesuré à l'aide d'une balance les forces délivrées effectivement par les moteurs (figure 42), en fonction de la position (par soucis de commodité, on a mesuré ces forces uniquement selon z, en ce plaçant en $x = y = 0$)

Sous Matlab, les différentes positions sont définies selon les 3 axes (x, y et z) avec des valeurs variant de -60 à +60. Les forces sont définies par des valeurs variant de -20 (le plus fort vers le bas) à 20 (le plus fort vers le haut), avec en 0 l'inactivité des moteurs.

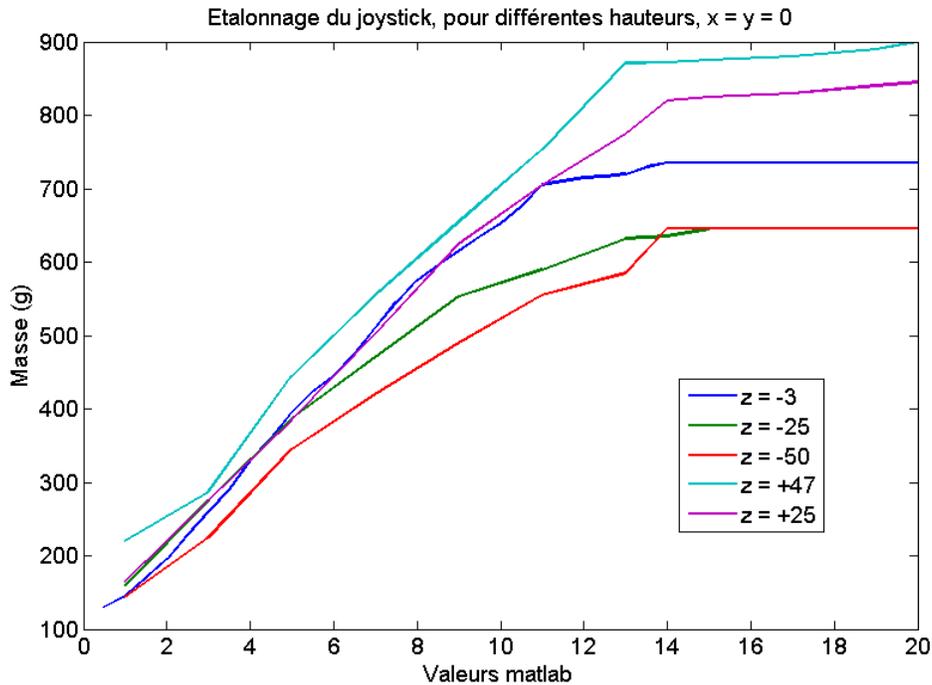


Figure 42 : Calibrage du Falcon

Ainsi on peut constater qu’une valeur de force donnée a un résultat différent en fonction du placement de la boule du joystick : plus elle est placée haute, plus la force vers le bas est importante. On remarque cependant qu’il y a peu de changements entre $z = -3$ et $z = 25$ à condition de rester en dessous de 700g. On fera en sorte d’utiliser cette partie de l’espace en particulier.

Enfin on a vérifié la résolution du joystick à l’aide de Matlab (en regardant le plus petit déplacement enregistré), et celle-ci est de 0,3mm ($300\mu\text{m}$). Soit 5 fois moins importante que celle indiquée par le fabricant.

tests

Plusieurs tests d’ordre académique ont été réalisés sur le joystick, afin de se familiariser avec son utilisation :

- simuler différents ressorts (linéaire, avec ou sans hystérésis, logarithmique, etc...)
- une simulation de masse avec inertie
- une touche de piano avec double échappement
- un instrument de musique

Si ces différents tests ont permis de se familiariser avec la programmation du robot, ils n’ont pas tous eu des résultats convaincants, en particulier les plus compliqués (la touche de piano et l’inertie). On s’est aperçu que le système joystick-ordinateur est un peu lent dans ses réactions pour certaines tâches (principalement en ce qui concerne

l'inertie, qui demande une réponse très rapide). La vitesse de réaction dépend de la complexité du programme et de la machine l'exécutant (voir Annexe H).

5.3 Simulation

On va procéder à quelques petites simplifications par rapport au comportement de la touche réelle :

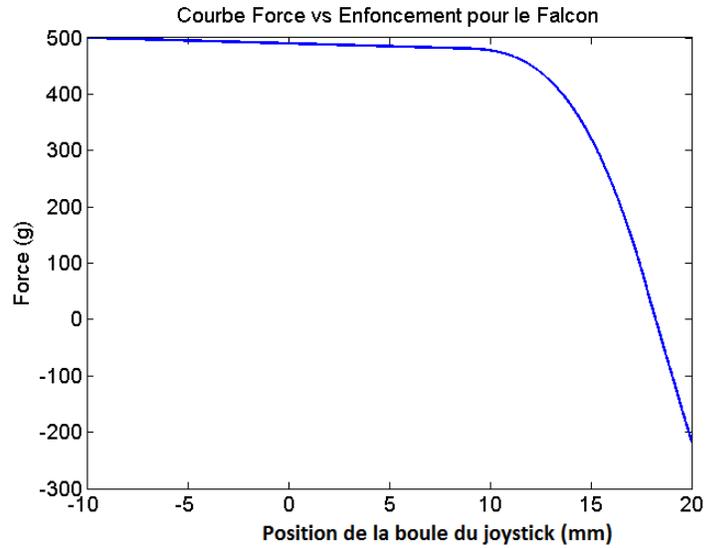
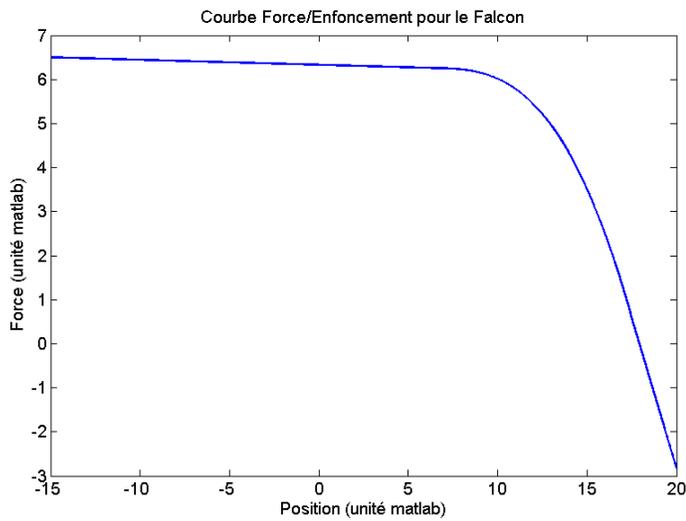
- concernant la gestion du niveau sonore, on va utiliser le fit du paragraphe 3.3 ; ainsi le volume sonore ne dépendra que de la force appliquée à la touche, et non de la fréquence de la note jouée
- de même, on ne fait pas chuter brutalement le son quand on relâche la touche (paragraphe 3.2), mais on considère que le système est réversible
- concernant l'aspect mécanique, on ne tient pas compte de l'hystérésis sur l'enfoncement en relevant la touche (paragraphe 3.4), les tests ayant montré que ce joystick ne peut gérer une hystérésis aussi faible

On va séparer le raisonnement en deux parties : l'haptique et la gestion du son.

Haptique

Tout ce qui concerne le toucher est géré par un programme sous Matlab . Le principe du programme est le suivant :

- il faut déjà que le joystick supporte le poids de l'ensemble du système (les 3 bras du joystick, le bras de levier et la boule) au repos, de sorte à ce que la "masse" semble nulle lorsque la touche est à l'horizontale, soit environ 500g
- on a ensuite adapté le fit "Force vs Enfoncement" (figure 27 du paragraphe 3.4) au joystick, de sorte à obtenir le même rendu sous le doigt (figures 43 et 44)
- enfin, afin d'éviter que le joystick ne se bloque (que la boule ne redescende pas) lorsqu'on relâche la touche, celui-ci applique une force de soutien plus faible lorsque la touche reste au même endroit ou quand la boule redescend.



Figures 43 et 44 : Courbes de Force vs Enfoncement pour le Falcon

L'enfoncement en mm de la boule du joystick (soit trois fois plus que celui de la touche) est centré sur le même Zéro que pour les valeurs Matlab.

Pour vérifier le comportement du joystick, on applique à la touche simulée, le même protocole de mesures que pour la touche d'Ondes Martenot. On obtient les résultats suivants (figure 45) :

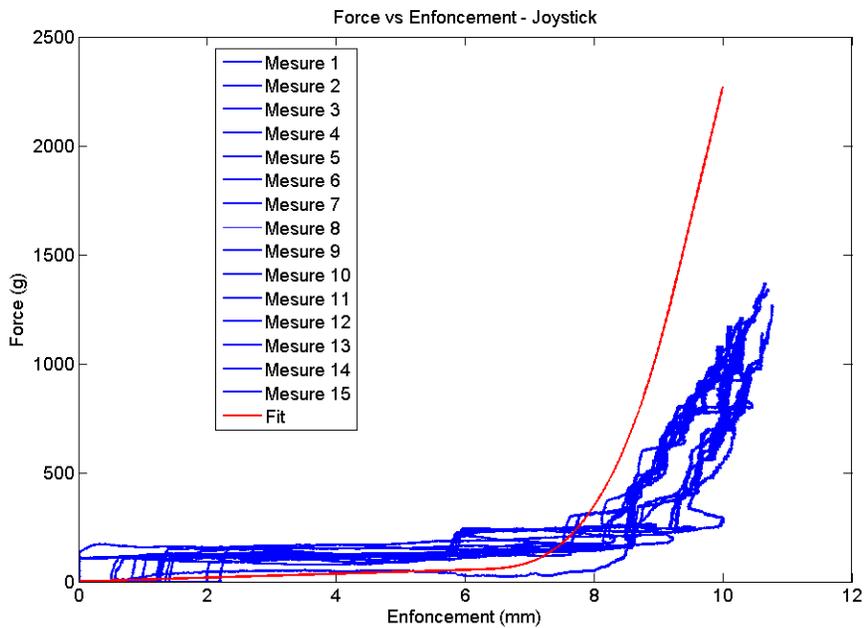


Figure 45 : Courbes de Force vs Enfoncement mesurées sur le dispositif

On constate plusieurs choses :

- en début de course, il faut appliquer une force de 100 à 200g pour commencer à enfoncer la touche, de 0 à 6mm d'enfoncement
- à partir de 6mm d'enfoncement, la touche s'enfonce par paliers
- en fin de course, la pente des mesures est environ 2 fois plus faible que celle du fit

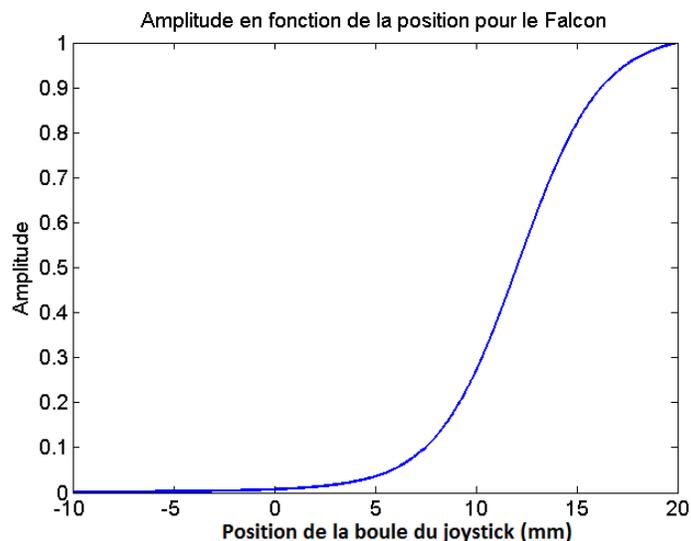
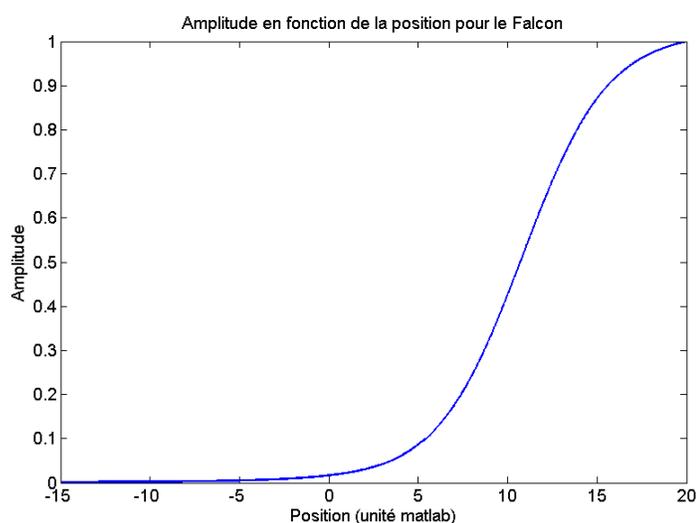
Les deux premiers points sont dûs à la diminution de la force de soutien quand on arrête d'enfoncer, ou quand on enfonce lentement. Ainsi lors d'un arrêt, il faut appuyer plus fort pour repartir, le joystick aidant à nouveau dès qu'il y a mouvement, l'enfoncement augmente soudainement.

Le troisième point est probablement dû au système complet. Cela reste cependant proche du fit.

On verra si ces différents points posent problème lors d'un test avec un musicien (voir 5.4).

Son

Le son est lui géré en deux fois. Son amplitude est générée par Matlab, de sorte qu'à une position donnée, on renvoie une amplitude donnée (figure 46 et 47), tirée des mesures (figure 24), à ceci près qu'on utilise ici une amplitude normalisée.



Figures 46 et 47 : Courbes d'Amplitude en Enfoncement pour le Falcon

En terme de programmation, le joystick fonctionne au sein d'une boucle de soumission. A chaque boucle, il regarde la position de la boule, et répond une force via les moteurs, et une amplitude qui est enregistrée par Matlab dans un fichier. Ceci amène à la deuxième partie concernant le son : sa génération en fréquence, et l'utilisation de l'amplitude. Pour cela, on a fait un patch en Pure Data (Figure 48). Ce patch récupère la fréquence en temps réel via un contrôleur MIDI (clavier MIDI) branché à l'ordinateur, ainsi que l'amplitude à donner au signal en ouvrant le fichier écrit par Matlab. Il réalise

l'opération de récupération d'amplitude toutes les 10 ms. C'est assez lent, mais si on le fait aller plus vite, des craquements surviennent dans le son.

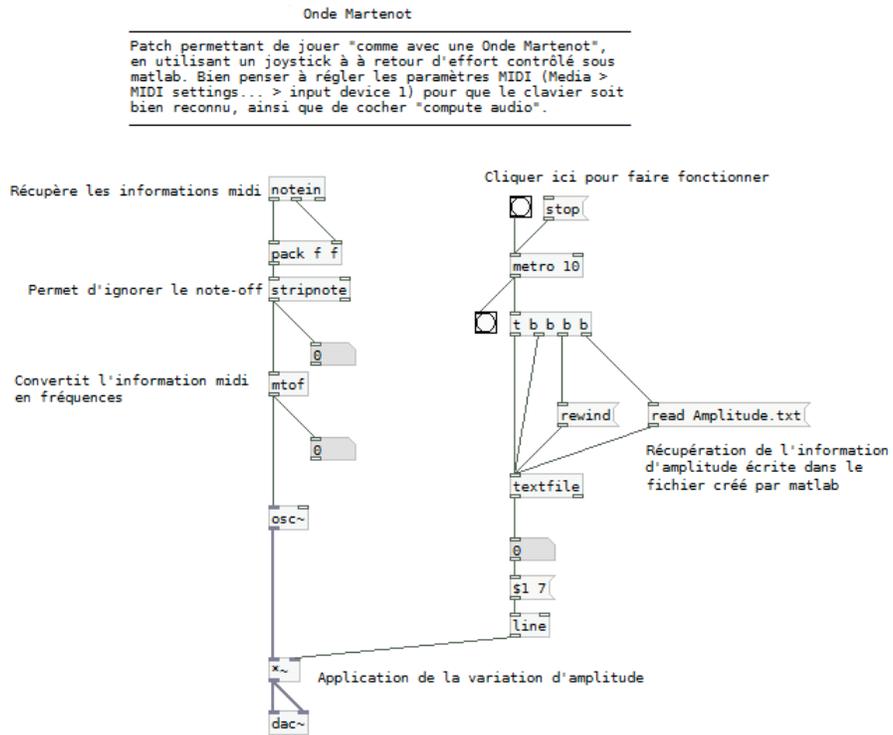


Figure 48 : Patch Pure Data

De même que pour l'haptique, on vérifie le comportement électrique de notre système (figure 49) :

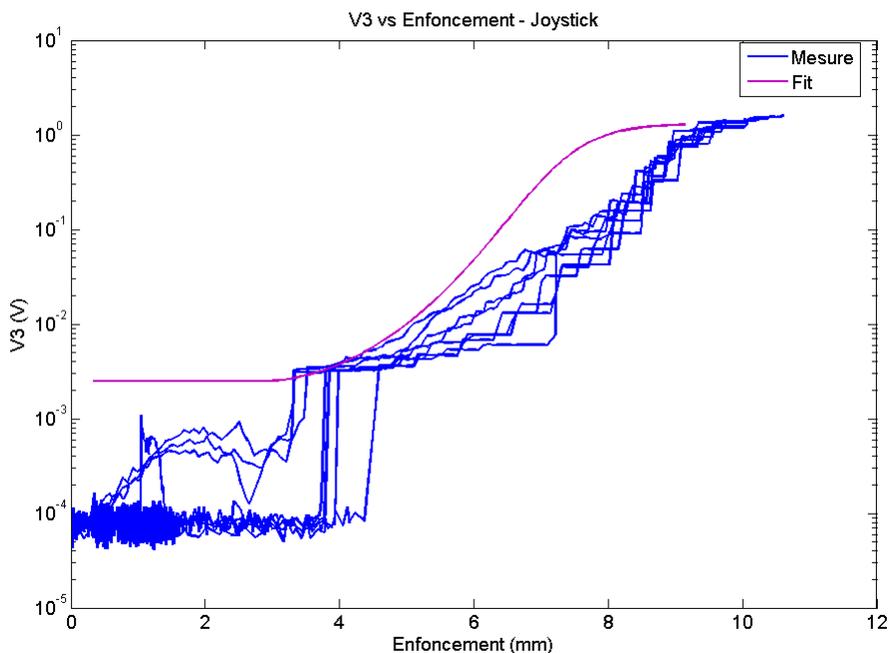


Figure 49 : Courbes de V_3 vs Enfoncement mesurées sur le dispositif

Pour obtenir la figure 49, il a fallu recaler temporellement les mesures de V_3 et d'enfoncement. En effet, on a constaté un décalage en temps de 170ms entre les capteurs et la réaction en sortie de l'ordinateur. Ce délai est vraisemblablement dû à la carteson de l'ordinateur utilisé, et provoque un retard assez important entre l'action sur la touche et la réaction sonore. Par ailleurs, on retrouve l'effet du coupe-circuit (entre 3,5 et 4mm), que l'on a simulé pour la même raison que Martenot : pour éviter d'avoir du son quand la touche est relevée. On retrouve le même phénomène de paliers que pour la figure 45. Enfin, les minimas et maximas sont les mêmes que pour le fit, reliés par une pente environ 2 fois plus faible.

5.4 Test avec un musicien

On a pu recevoir un Ondiste professionnel, Augustin Viard, pour tester et critiquer notre système, le but étant de le comparer à son expérience de l'instrument et à ce qu'il recherche en tant qu'Ondiste lorsqu'il joue des Ondes Martenot. Voici ce que l'on a pu retenir de l'entretien :

- 1 - lors du premier geste (lorsque la touche est relâchée et que l'on appuie dessus), ainsi que tant que la touche est en mouvement, la touche répond bien au geste (il est facile d'appuyer), mais le son "n'arrive pas comme souhaité". Il y a un temps de latence entre le geste et la réponse tant pour le toucher que pour le son

- 2 - la touche présente une résistance par paliers à l'enfoncement lors des mouvements lents
- 3 - l'impression de pousser un levier "très loin", plutôt que l'impression d'avoir un sac sous la touche
- 4 - parfois, le levier se bloque
- 5 - l'envie de "gérer (le jeu) en enfoncement, mais au bout d'un moment ça résiste trop et il faut passer en force"

En remarque, sur les Ondes Martenot, il n'est jamais dur d'appuyer, avec une "impression d'augmentation linéaire de la force, de résistance progressive mais dont la réponse sonore est non linéaire". Cependant

- 6 - le jeu rapide (des notes d'une durée de l'ordre du $\frac{1}{4}$ de seconde, trémolo) est très réaliste, malgré la présence d'une légère résistance au début
- 7 - le jeu en détachés est assez proche de la touche originale mais le son ne disparaît pas assez vite

On peut expliquer la plupart de ces remarques :

- le point 1 est explicable par le problème de latence de la carte-son
- les points 2 et 4 sont les effets de paliers observés figures 45 et 49
- les points 3 et 5 sont surprenants, dans le sens où la force délivrée est moins importante que pour la mesure sur l'instrument (voir figure 45), et peuvent résulter de la vision du dispositif (ressentir un levier car on voit un levier)
- les points 1, 6 et 7 montrent que le joystick est plus efficace lors de mouvements rapides et constants que lorsqu'on cherche à jouer avec une finesse plus importante
- le point 5 semble valider l'hypothèse énoncée en **3.5 e)**

En conclusion, on peut dire que notre système n'arrive pas à remplacer pleinement la touche des Ondes Martenot, malgré quelques bons points (en jeu rapide). Les problèmes rencontrés sont vraisemblablement dûs au joystick (en plus de la carte-son) qui ne permet pas de reproduire la finesse attendue.

6 Conclusion

Ce stage sur les Ondes Martenot m'a permis de commencer un travail de recherche en prenant le projet à son stade initial. Celui-ci, complètement inédit, a permis de s'intéresser à un instrument peu étudié, ainsi que de fréquenter des musiciens professionnels le pratiquant. D'autre part, l'étude d'un système à retour d'effort est tout à fait "dans l'air du temps". On a pu rendre compte d'un certain nombre de choses.

Le transducteur "Ondes Martenot"

La touche d'expression des Ondes Martenot se comporte comme un transducteur convertissant de manière tout à fait reproductible le geste musical en son.

On a pu trouver différentes qualités à ce transducteur :

- il a un fonctionnement instantané (du point de vu des sensations humaines) avec un temps de réaction de 2ms
- il permet à l'instrument une dynamique exceptionnellement grande, de 50dB pour un déplacement de quelques mm
- il donne au sac de poudre le constituant une double fonction : un rhéostat gérant l'intensité du son et un indicateur pour le ressenti du musicien, du point de vue du toucher
- il se contrôle tant par l'enfoncement, au début du geste musical, que par la force appliquée dessus, plutôt en fin du geste, quand on appuie directement sur le sac

Nos résultats de mesures

Nos mesures ont permis de préciser ces points. Ainsi, on a pu observer que :

- le sac de poudre ne présente aucun effet capacitif, ainsi il peut être assimilé à une pure résistance variable
- la touche peut être utilisée sur une amplitude d'enfoncement de 1cm et des forces allant jusqu'à 2kg, cependant le jeu requiert une grande finesse, se passant essentiellement sur une variation d'enfoncement de 3mm et une variation de force de l'ordre de 150g
- on a obtenu les courbes maîtresses traduisant le comportement électrique (y compris de façon analytique pour $20\log(V_3)$ avec l'enfoncement) et le comportement mécanique (force en fonction de l'enfoncement) de la touche
- on a pu valider nos résultats à l'aide d'un petit modèle mécanique
- concernant le vieillissement de la poudre, on a constaté une chute brutale du niveau sonore quand on relève la touche, due à une perte d'élasticité du cuir du sac
- les résultats que l'on a obtenu ont également servi dans le cadre d'une étude paramétrique visant à reproduire de la poudre (stage de Marguerite Jossic)

Haptique

On a alors tenté de reproduire le comportement de ce transducteur à l'aide d'un dispositif haptique, un joystick à retour d'effort. On a alors adapté le résultat de nos mesures à ce joystick. Le résultat, s'il n'a pas été pleinement convaincant pour un musicien dans le cadre d'une utilisation comme instrument de musique, reste un point de départ pour d'autres études. En effet, les capacités du joystick se sont révélées bien insuffisantes, particulièrement du point de vue de la précision.

Cependant, il pourrait être intéressant de partir de cette base pour concevoir un système dédié à la simulation des Ondes Martenot. Par exemple, un capteur actionneur qui serait plus compact et qui permettrait de gérer, à l'aide d'un moteur et d'un détecteur de position, l'amplitude d'un signal audio et la force ressentie sous le doigt.

Résumé/Abstract

Les Ondes Martenot sont l'un des plus anciens instruments de musique électronique. L'étude que l'on a menée porte sur la touche d'expression de cet instrument, constituée d'un sac de poudre "magique" dont les propriétés exactes (proportion des composants, etc...) restent méconnues, et vise à la remplacer par un dispositif haptique à retour d'effort. Ceci a pour but de pérenniser l'instrument en s'affranchissant de cette partie vieillissante (la poudre a une durée de vie de 10 ans).

Pour cela, on a caractérisé le comportement électrique et mécanique du sac d'un instrument en jeu (tensions autour du sac, résistance électrique du sac en fonction de l'enfoncement de la touche, force appliquée par le musicien sur la touche en fonction de l'enfoncement, mesures de niveau sonore, etc...). On a ainsi pu programmer et équiper un joystick à retour d'effort, le *Novint Falcon*, pour reproduire le résultat de nos mesures (utilisation de Matlab, PureData).

Des tests avec un musicien ont permis de se rendre compte que notre dispositif, s'il avait quelques qualités (en jeu rapide principalement), était bien trop imprécis pour permettre le jeu.

Ainsi il serait intéressant de poursuivre ce travail par la conception d'un dispositif dédié, tel qu'un capteur actionneur, en plus de travailler à la reproduction de la poudre originale.

The Ondes Martenot is one of the older electronic musical instruments. The study we led had been about the expressive key of this instrument, made up by a "magic" powder bag which exact properties (components ratio, etc...) stay unknown. We then aim at replace this key by an haptic device force feedback interface. This aims at perpetuating the instrument by freeing itself from this ageing part (the powder has a life expectancy of about 10 years).

For it, we described the bag electrical and mechanical behaviour on an instrument while playing (voltage around the bag, bag electrical resistance VS key sinking, musician's strength on the key VS key sinking, sound level measurements, etc...). We thereby could code and equip a force feedback joystick, the *Novint Falcon*, to reproduce our measurement results (using Matlab and PureData).

Tests with musicians let us see that our device had a few qualities (mainly in fast playing) but was too imprecise to allow real playing.

It thus would be interesting to continue this work, designing a dedicated device like a sensor actuator on top of trying to reproduce the original powder.

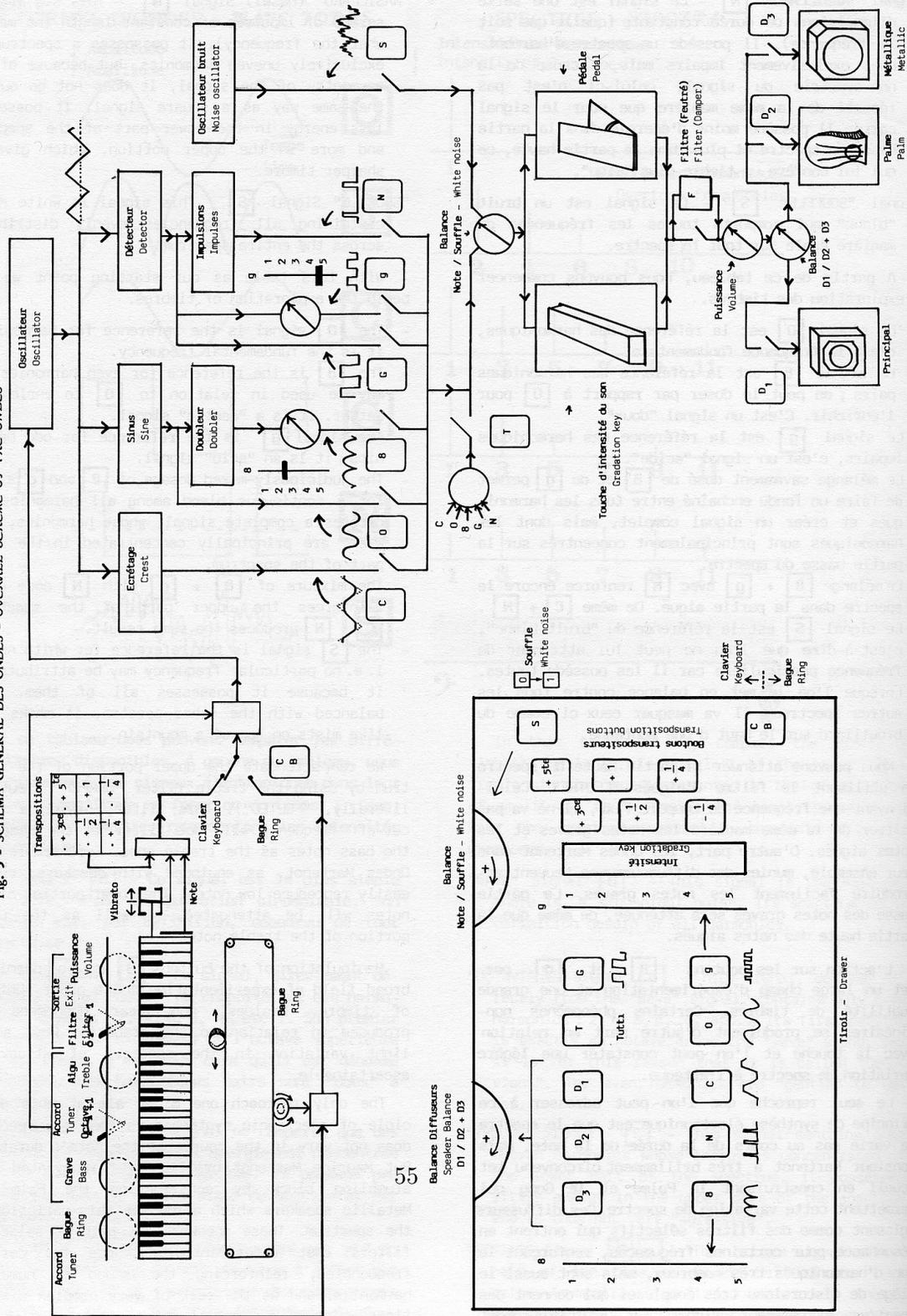
Références

- [1] <http://www.lam.jussieu.fr/>
- [2] <http://www.cite-musique.fr/francais/musee/recherche/conservation.aspx>
- [3] I Guillot, V Hartman-Claverie et S Vaiedelich, *Maurice Martenot, la poudre de l'enchanteur*, CIM09 (fifth Conference on Interdisciplinary Musicology), octobre 2009
- [4] E Leipp et M Martenot, *Les Ondes Martenot*, Bulletin du Groupe d'Acoustique Musicale (GAM), 1972
- [5] J Laurendeau, *Maurice Martenot, luthier de l'électronique*, Ed Dervy Livres, 1990
- [6] J Loriod, *Technique de l'Onde Electronique*, Ed Alphonse Leduc, 1982
- [7] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Haptique>
- [8] www.contrinex.com
- [9] http://fr.wikipedia.org/wiki/Capteur_de_proximite
- [10] Brochure Alcyon Electronique, *Découvrez une nouvelle technologie de détection*
- [11] CS Nicolopoulos, S Solomonidis, EG Anderson, JA Black, *In-shoe plantar pressur measurements for the diagnosis of different foot pathologies using FSR technology*, après 1995
- [12] Interlink Electronics, *FSR Force Sensing Resistor Integration Guide and Evaluation Parts Catalog*
- [13] Interlink Electronics, *Interlink Electronics FSR Force Sensing Resistors*
- [14] <http://www.eowave.com/>
- [15] <http://physique.paris.iufm.fr/exao/amplio/suiveurcomplet.htm>
- [16] <http://www.bksv.com/products/transducersconditioning/acoustictransducers/microphones/4191.aspx>
- [17] <http://www.cnsmdp.fr>
- [18] Collectif d'auteurs, direction D Mercier, *Le livre des techniques du son - Tome 1 - Notions fondamentales*, deuxième édition, Dunod, 1998
- [19] S Laroze, *Mécanique des structures - Tome 2 - Poutres*, 2ème édition, p.80, Eyrolles Masson, 1988
- [20] SP Timoshenko, *Résistance des matériaux - Tome 1*, p. 176, Dunod, 1977
- [21] <http://www.bois.com/particuliers/forum/sujet/20465>
- [22] http://fr.wikipedia.org/wiki/Contact_de_Hertz
- [23] JL Florens, A Luciani, C Cadoz et N Castagné, *Artistic Creation and Computer Interactive Multisensory simulation Force Feedback Gesture Transducers*, NIME-03 (Conference on New Interfaces for Musical Expression), 2003
- [24] G Casiez, *Contribution à l'étude des interfaces haptiques. Le DigiHaptic : un périphérique haptique de bureau à degrés de liberté séparés*, thèse, 2004

- [25] JL Florens, A Luciani, C Cadoz et N Castagné, *Haptics in Computer Music : a Paradigm Shift*, EuroHaptics 2004, 5-7 juin 2004
- [26] ERGOS Technologies, *A Nex Experince in Haptics*, Brochure, 2006
- [27] J Lozada, X Boutillon et M Hafez, *Modélisations mécaniques de la touche de piano et de son imitation haptique*, 18^{eme} Congrès Français de Mécanique, 2007
- [28] J Lozada, *Modélisation, contrôle haptique et nouvelles réalisations de claviers musicaux*, thèse, 2007
- [29] S Sinclair, *Force-Feedback Hand Controllers for Musical Interaction*, thèse, 2007
- [30] E Berdahl, G Niemeyer et JO Smith III, *Using Haptics to Assist Performers in Making Gestures to a Musical Instrument*, NIME-09, 2009
- [31] B Gillespie, *Haptic Display of Systems with Changing Kinematic Constraints : The Virtual Piano Action*, thèse, 1996
- [32] C Nichols, *The vBow : development of a virtual violin bow haptic human-computer interface*, Proceedings of the Conference on New Interfaces for Musical Expression, p.29-32, 2002
- [33] http://www.novint.com/index.php?option=com_content&view=article&id=39&Itemid=54
- [34] http://novint.com/index.php?option=com_content&view=article&id=41&Itemid=126
- [35] <http://manavkataria.wordpress.com/2009/11/26/tutorial-using-novint-falcon-with-matlab/>
- [36] <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/20455>
- [37] <http://www.youtube.com/watch?v=gIF711G-ajo>

A Annexe : Schéma de principe du fonctionnement des Ondes Martenot (©[6])

Fig. 3 - SCHEMA GENERAL DES ONDES - OVERALL SCHEME OF THE ONDES



B Annexe : Résultats expérimentaux : figures diverses

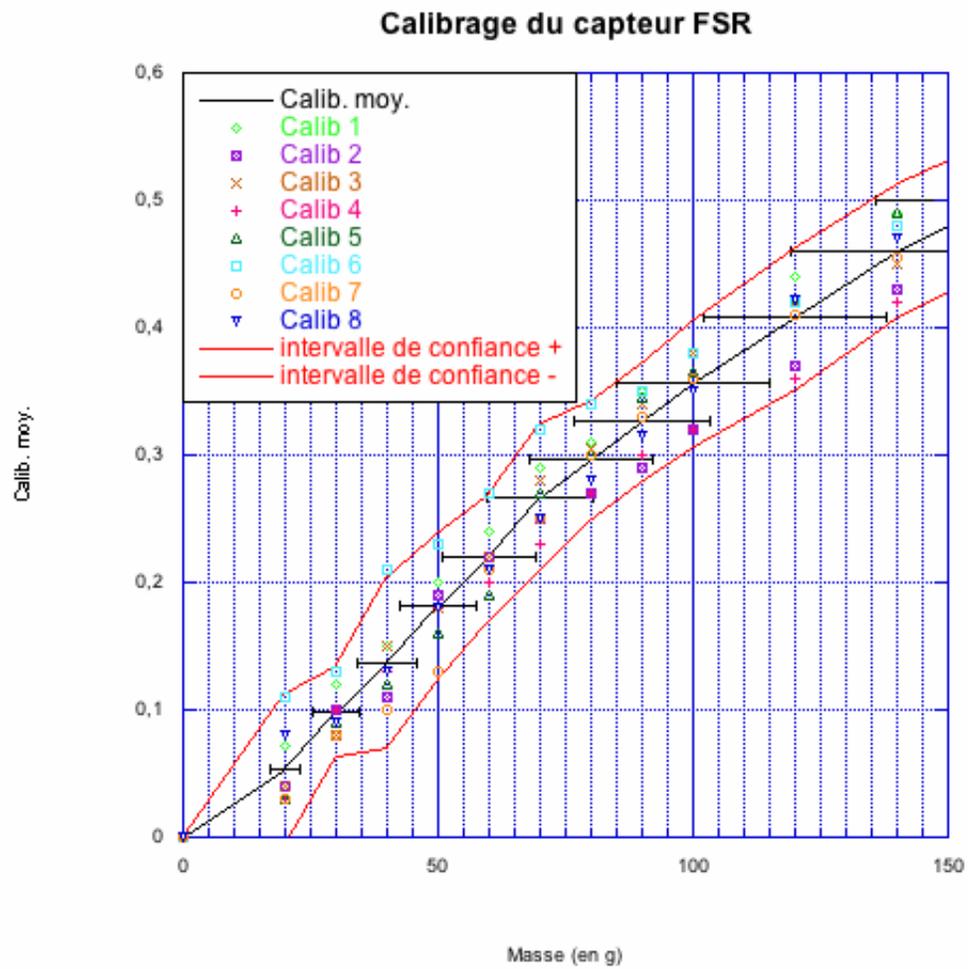


Figure 1 : Calibrage du capteur FSR - Zoom

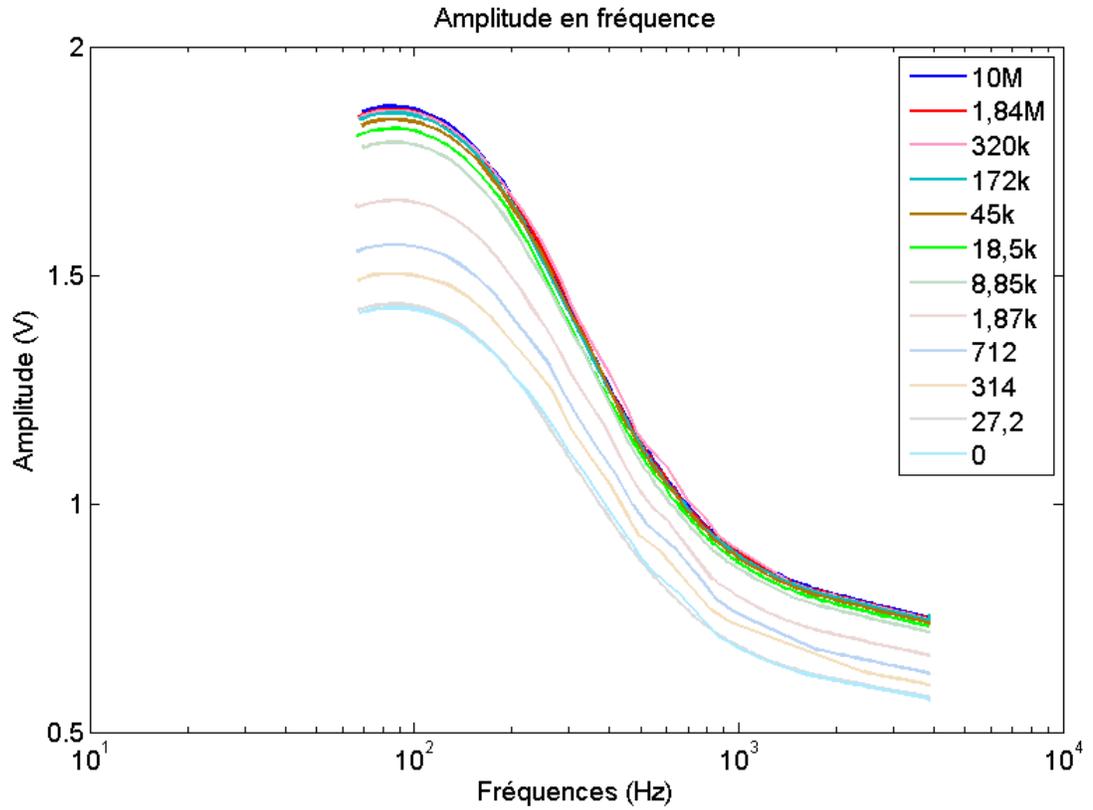


Figure 2 : Comparaison de différents V_1

On observe ici V_1 en fonction de la fréquence et de la résistance du sac. On constate que V_1 diminue jusqu'à 25% de sa valeur initiale quand la résistance diminue jusqu'à 0Ω , et on peut observer la pondération appliquée en fréquence, présente quelque soit la résistance.

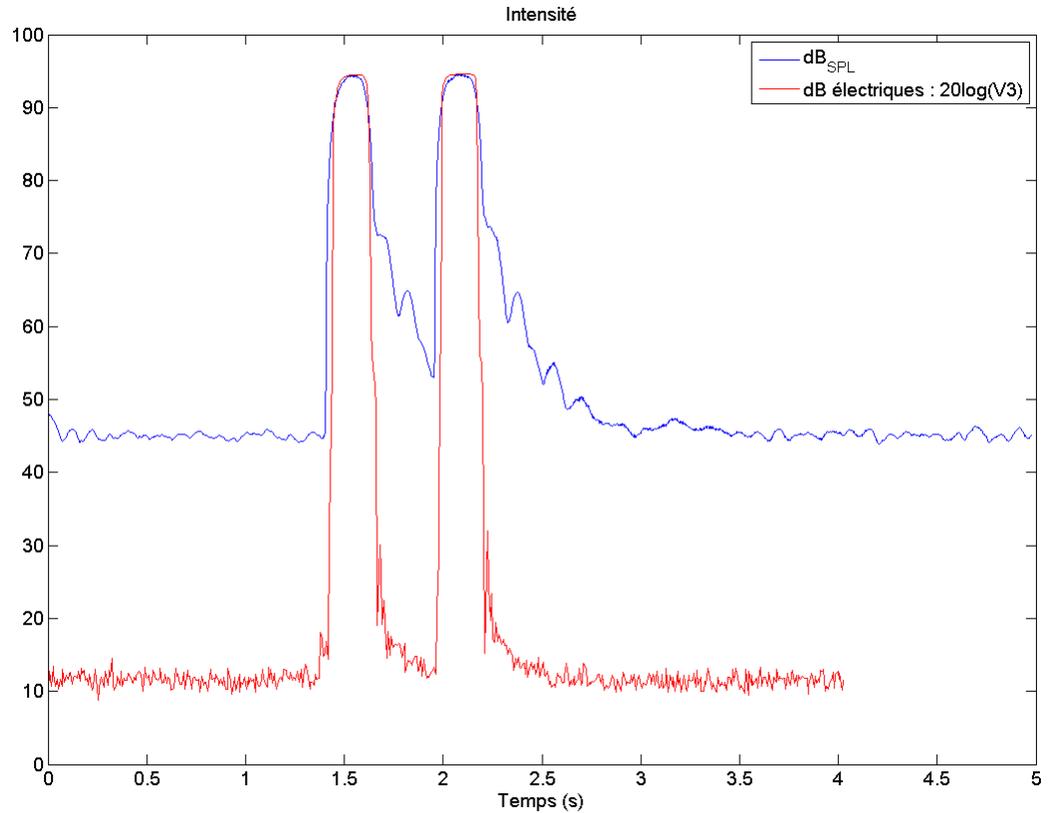


Figure 3 : Comparaison entre dB SPL et dB électriques - ajustement

Les dB_{SPL} sont tirés des mesures au microphone, tandis que les dB électriques sont calculés à partir des mesures de V_3 .

On remarque que les deux définitions des dB apportent la même information (ici, on a décalé les dB électriques pour que les sommets soient les mêmes), à ceci près que :

- les dB_{SPL} donnent des dB absolus
- compte-tenu de l'énorme dynamique des Ondes, le rapport signal/bruit du microphone devient gênant pour les sons faibles. Aussi on doit utiliser les dB électriques pour avoir de l'information sur les premiers 35dB

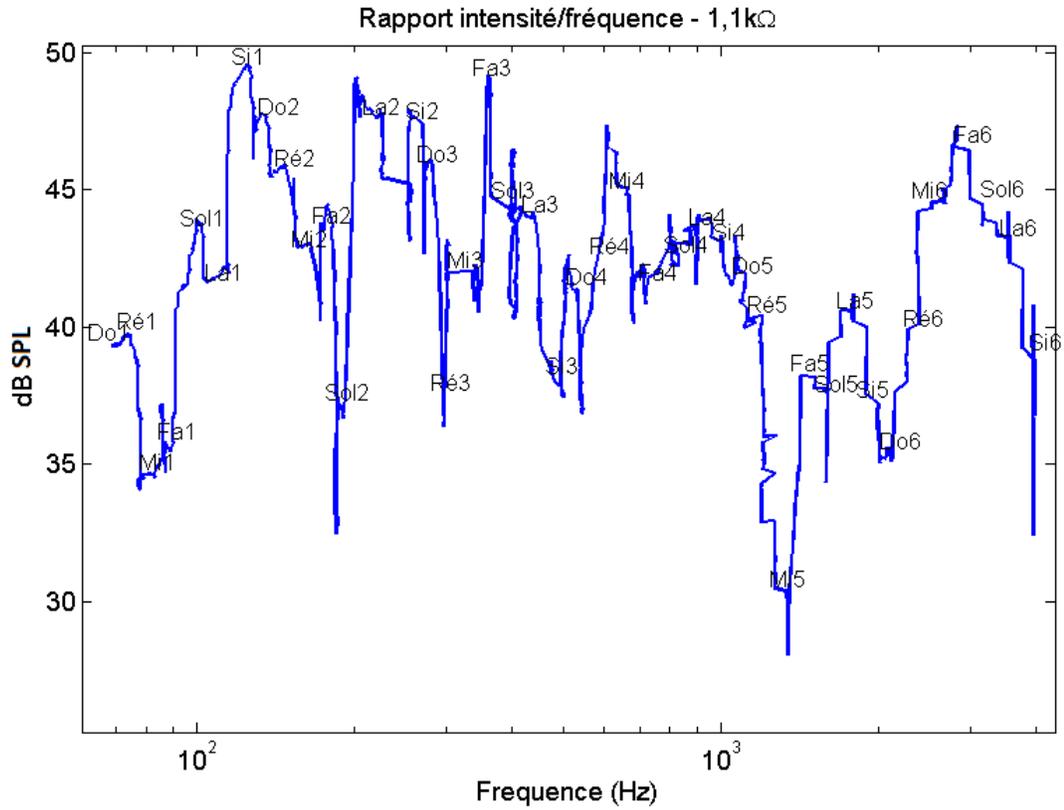


Figure 4 : Intensité en fréquence - Notes

On peut voir ici l'intensité des différentes notes du clavier pour une résistance constante de 1,1kΩ. On observe des variations d'intensité jusqu'à 20dB, entre Si_1 et Mi_5 . Ceci est sans doute lié à la réponse du HP et aux modes de propagation dans la salle.

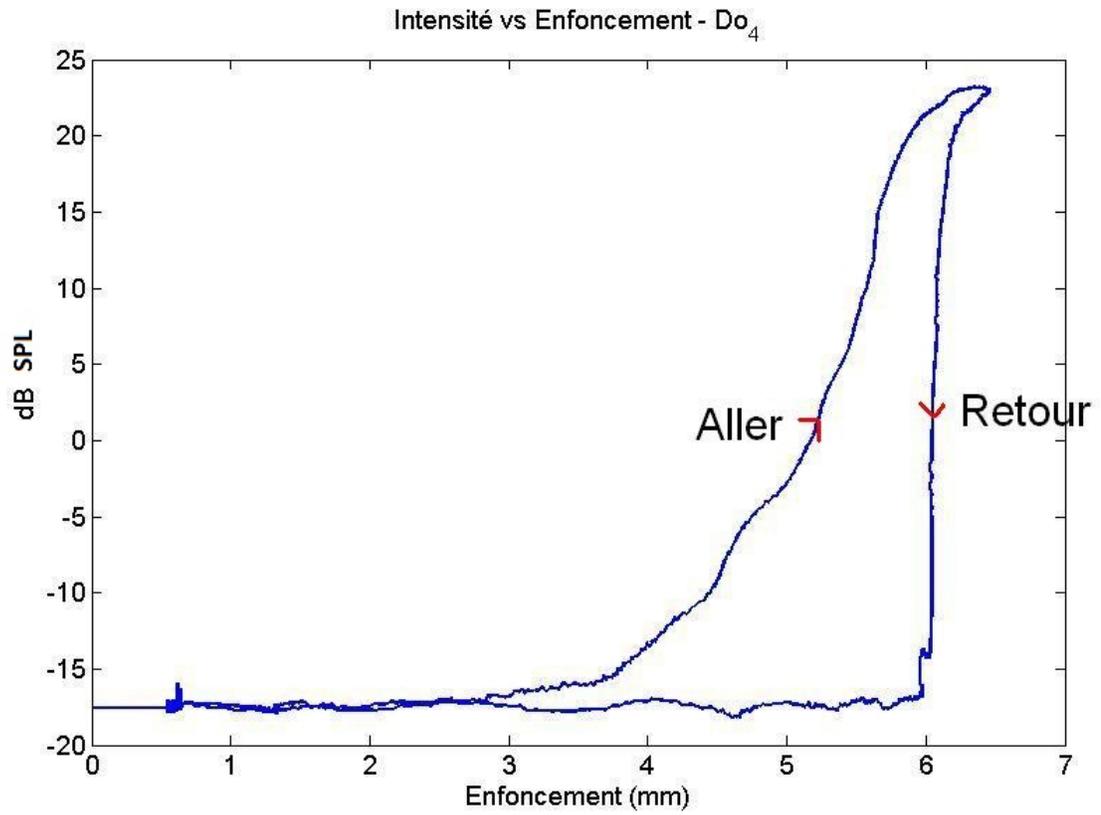


Figure 5 : Intensité vs Enfoncement

L'aller est l'enfoncement de la touche, le retour le relâchement de celle-ci. On constate que lorsqu'on relâche la touche, l'intensité sonore diminue brusquement. C'est l'effet du vieillissement (de la poudre, en perte d'élasticité du cuir du sac), aux dire des Ondistes.

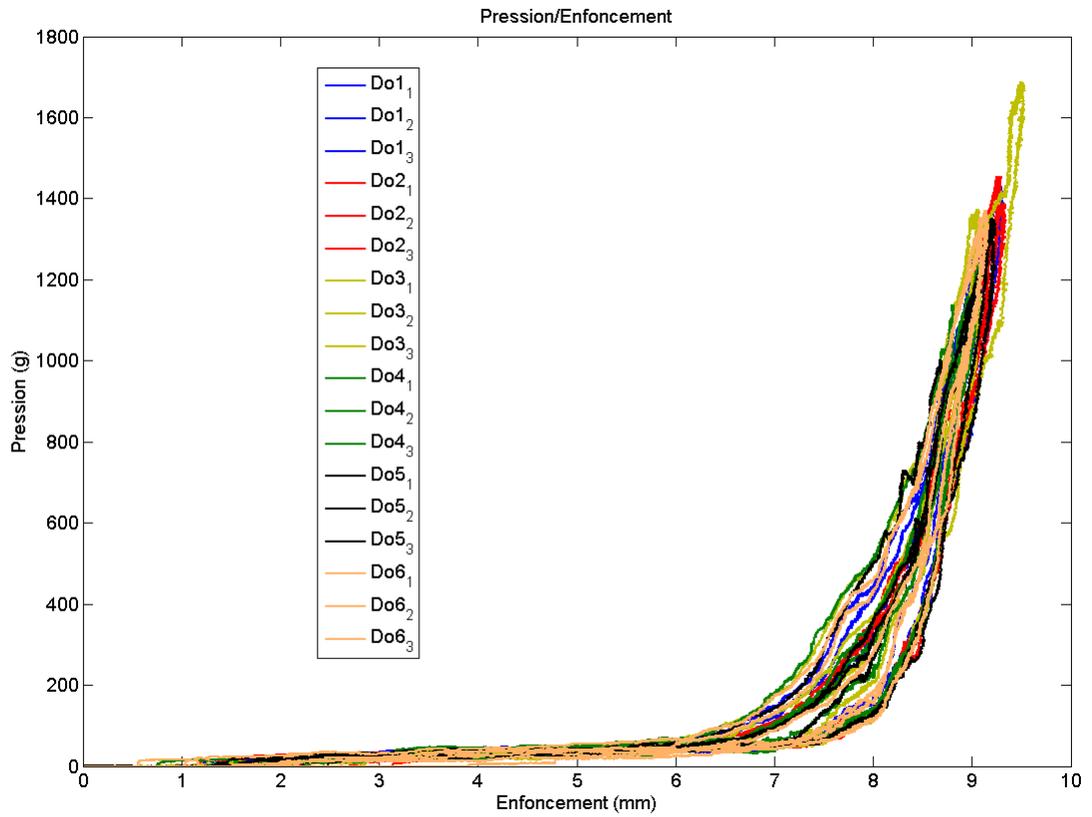


Figure 6 : Force vs Enfoncement - Aller et retour

Ici on observe 18 courbes de Force vs Enfoncement. On constate que cela reste tout à fait reproductible, et ce, que l'on appuie lentement (plusieurs secondes) ou très rapidement (percussion de l'ordre du dixième de seconde).

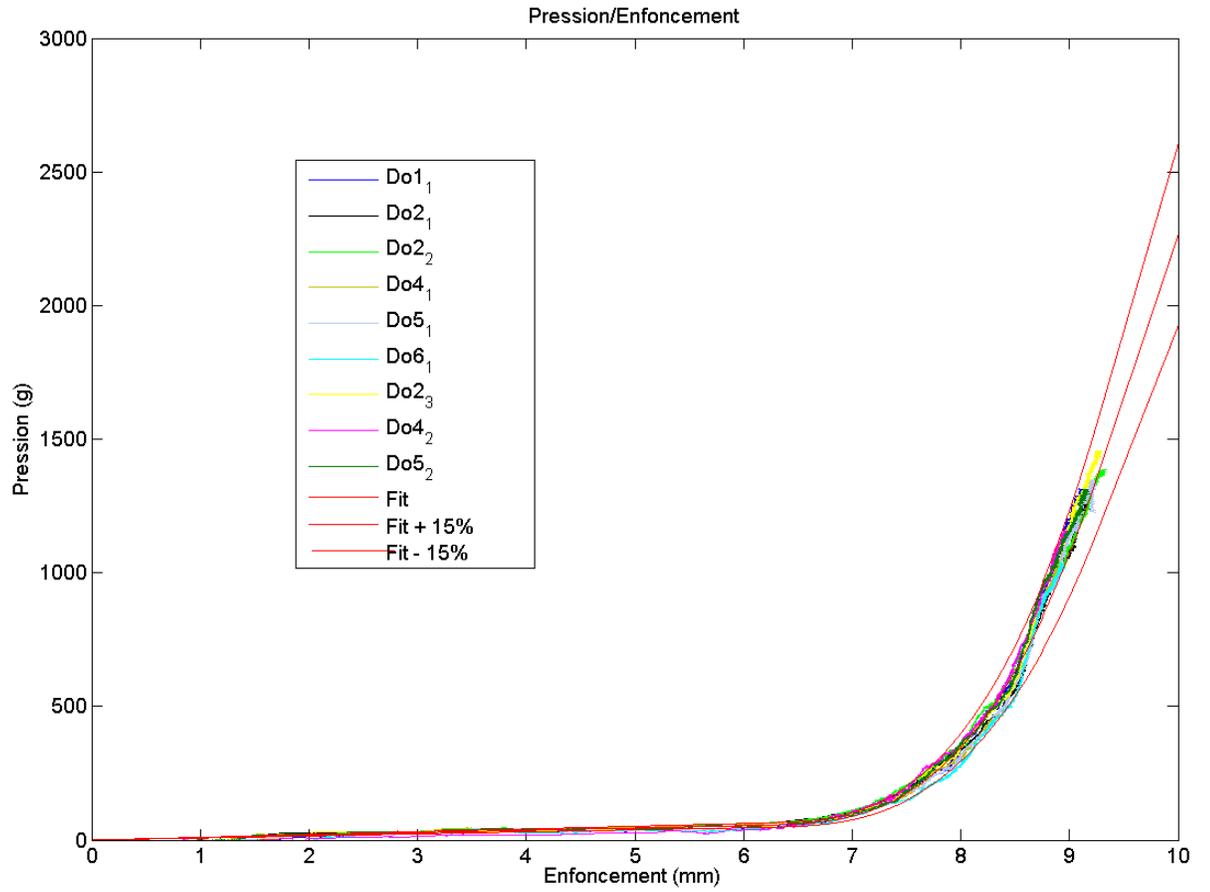


Figure 7 : Fit en pression vs enfoncement

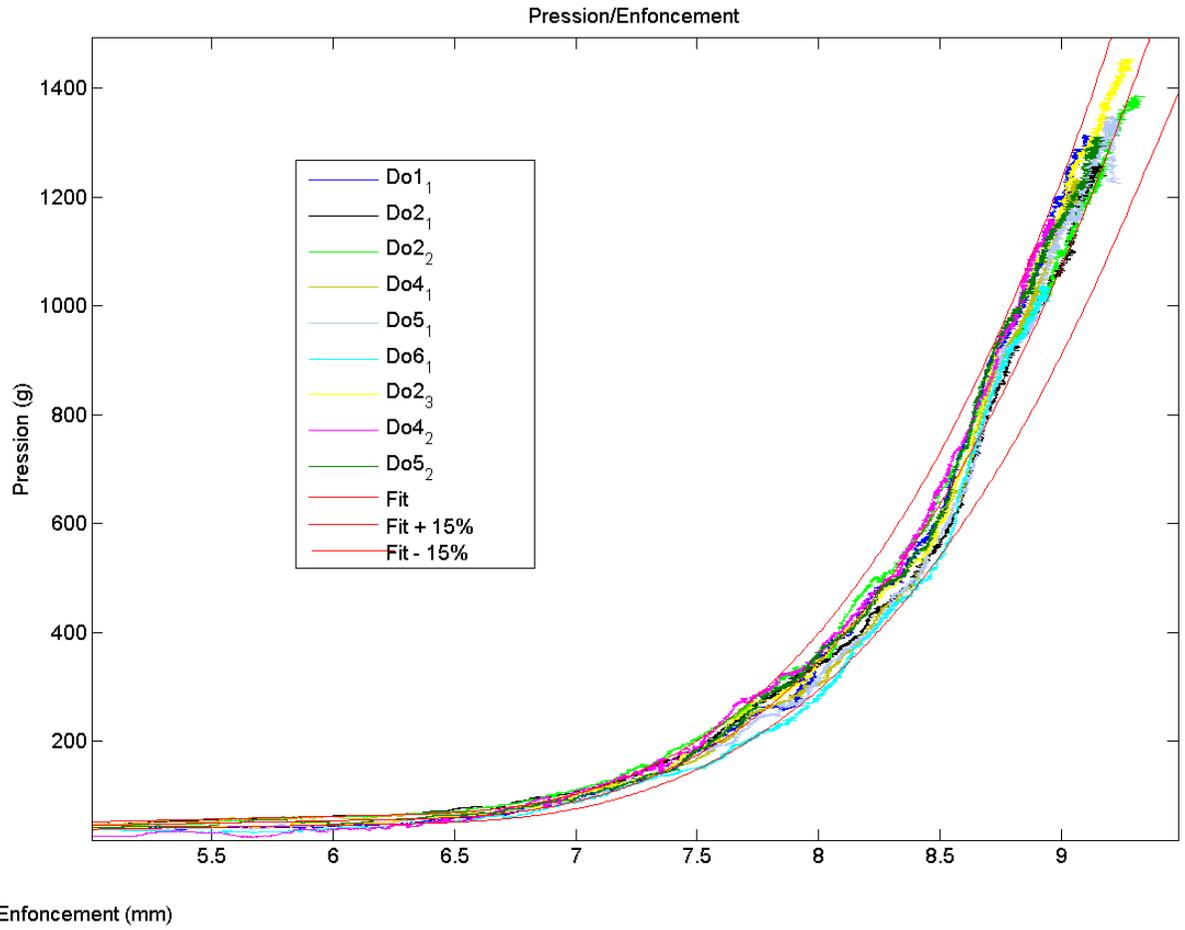


Figure 8 : Fit en pression vs enfoncement - zoom sur la partie "sac"

Recapitulatif :
dB vs Enfoncement

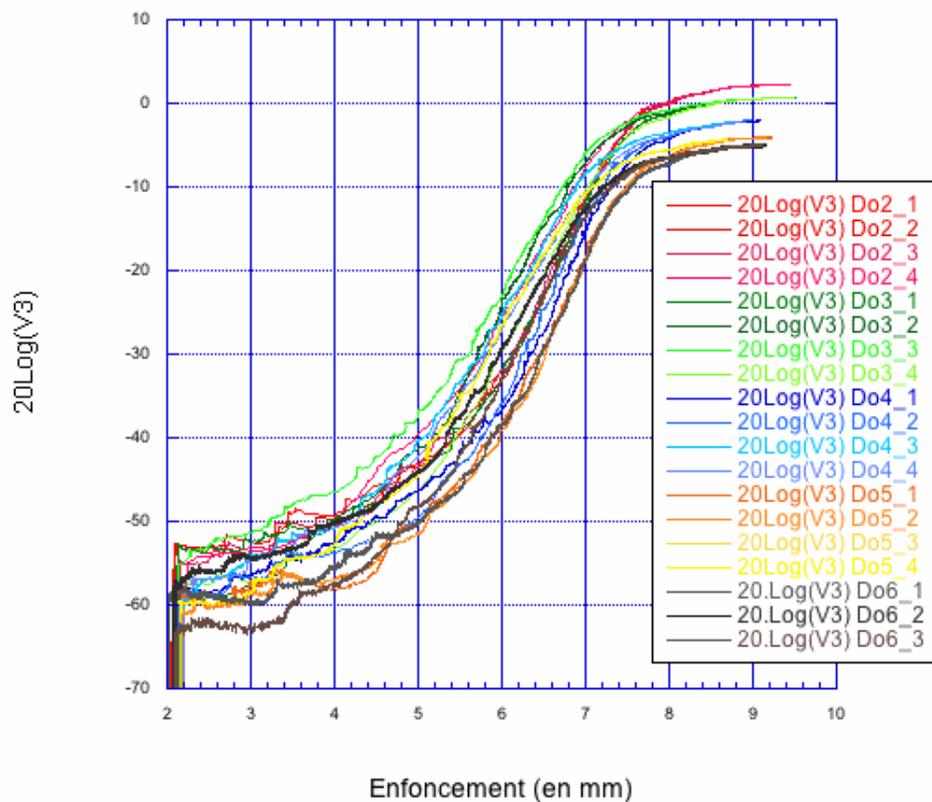


Figure 9 : dB vs Enfoncement pour 19 notes

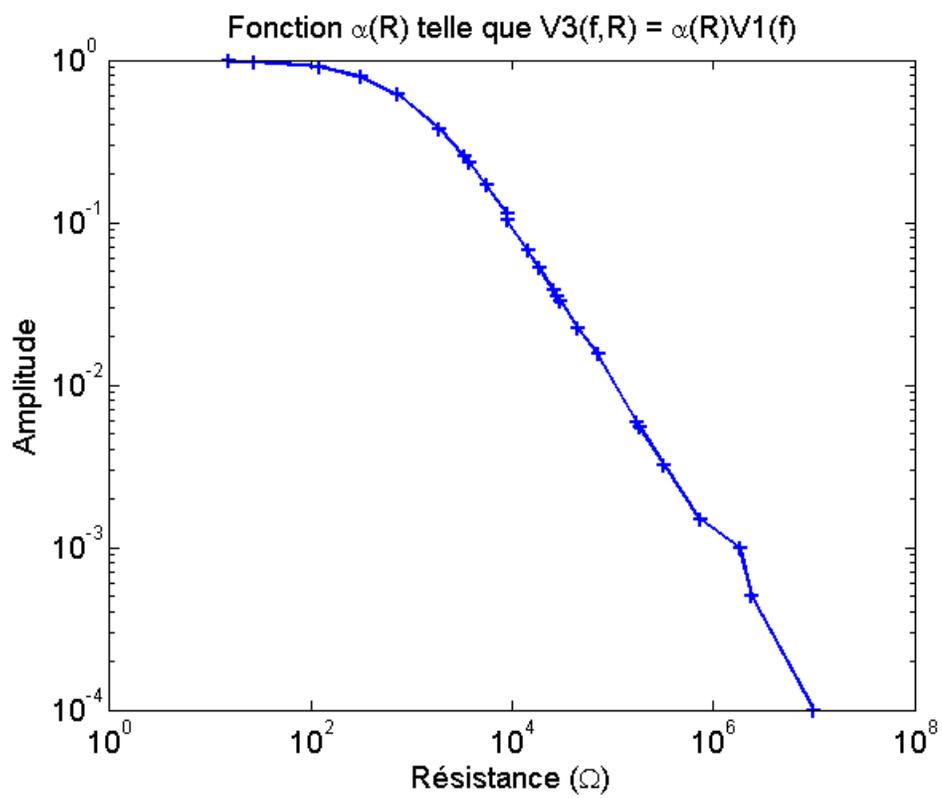


Figure 10 : $\alpha(R)$

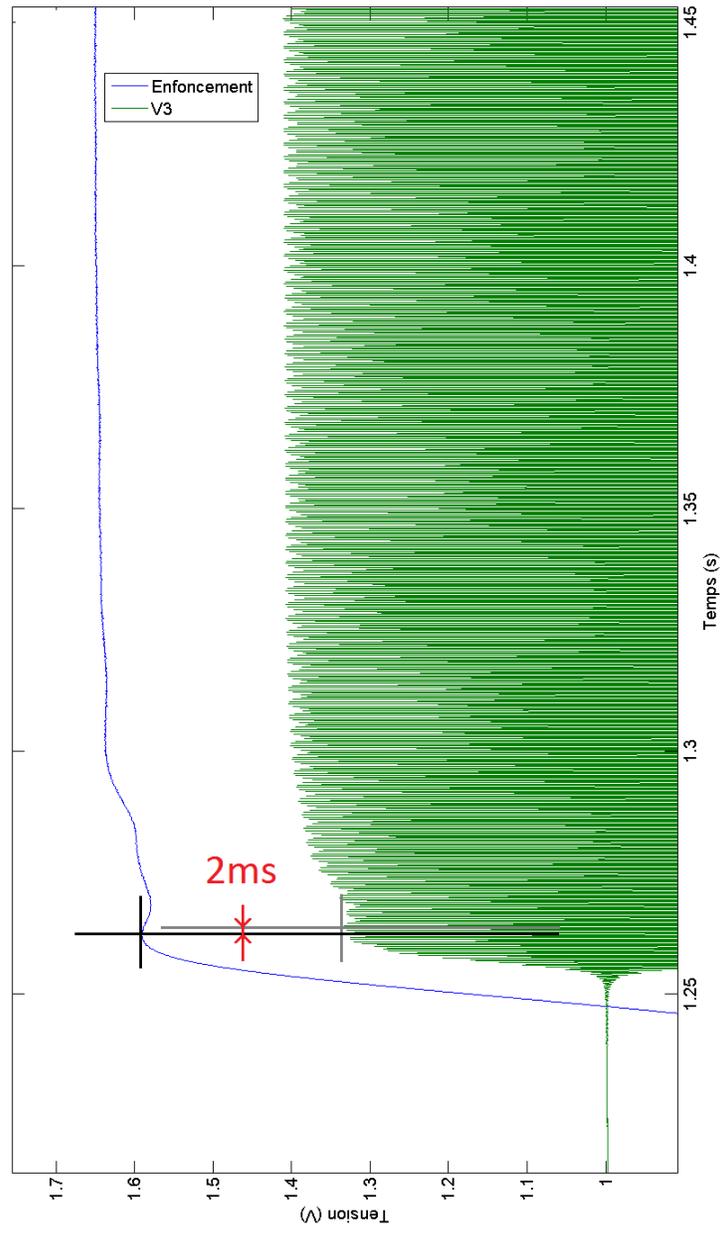


Figure 11 : Temps de réaction

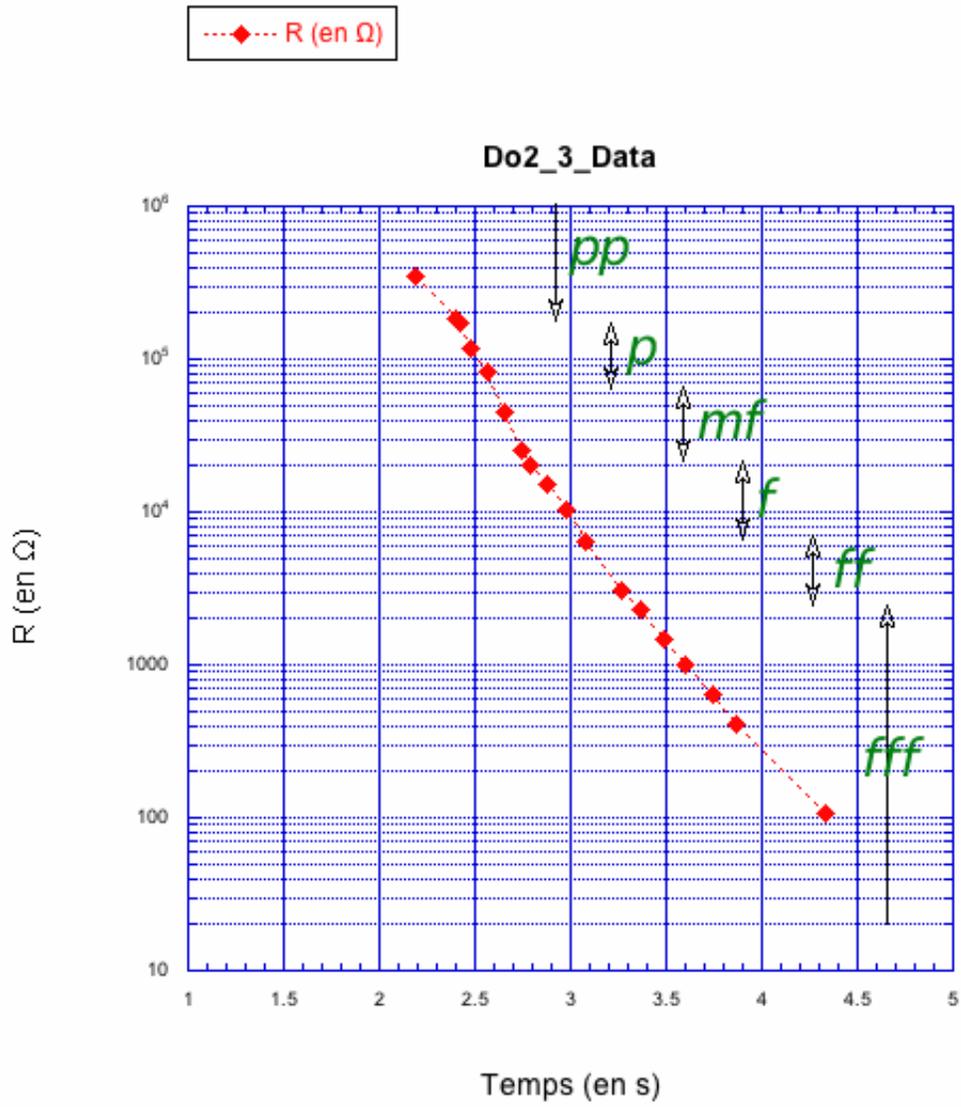


Figure 12 : dB vs R pour l'expérience décrite en 3.5

D Annexe : Notice du Falcon avec Matlab

Notice d'installation et d'utilisation du Joystick Novint Falcon pour jouer des Ondes Martenot

Installation

Il faut avoir Matlab et Pure Data sur l'ordinateur, ainsi que le joystick installé selon la notice jointe lors de l'achat.

Ensuite, il faut récupérer la librairie Matlab disponible sur le lien suivant :

<http://manavkataria.wordpress.com/2009/11/26/tutorial-using-novint-falcon-with-matlab/>

Bien suivre les différentes instructions, c'est ce qui permettra d'utiliser le joystick via Matlab. Toujours pour Matlab, il est nécessaire d'utiliser la fonction "stoploop", disponible ici :

<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/20455>

A nouveau, bien suivre les consignes. Il est nécessaire de ranger les différents programmes (*test_systeme_metal*, *Simulation_Onde_PD_line*, *stoploop*, *haptiquedevice_list*) tous au même endroit, à savoir le dossier matlab de l'Haptique Library, installée précédemment.

Une fois tout cela installé, il n'y a plus qu'à lancer le programme *haptiquedevice_list* (cela permet à matlab de reconnaître le joystick), puis *test_systeme_metal*, et le patch PureData : *Simulation_Onde_PD_line*.

Remarques

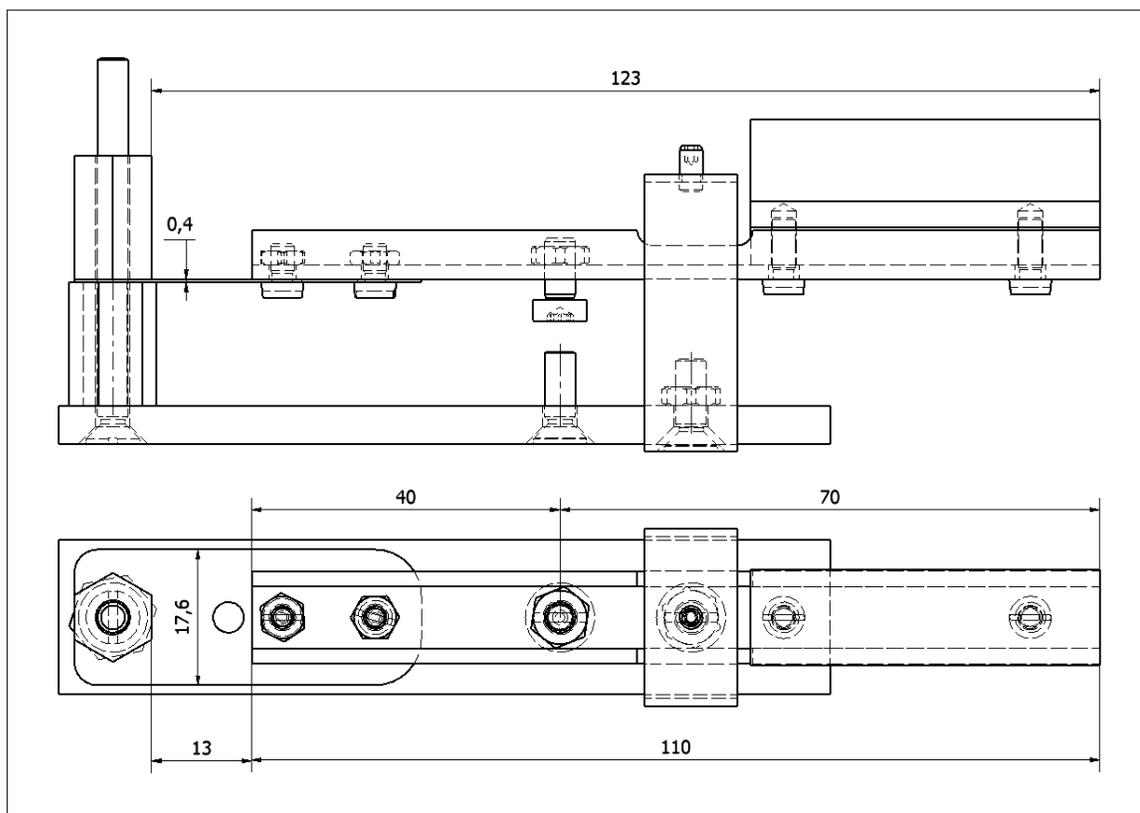
Lors du lancement du programme, le joystick peut réagir de 3 façons :

- Brille en rouge, les bras ne bougent pas : initialisation du test
- Brille en bleu, les bras font bouger la touche : le joystick fonctionne
- Brille en vert, les bras ne bougent pas : Il y a un problème.

Dans ce dernier cas :

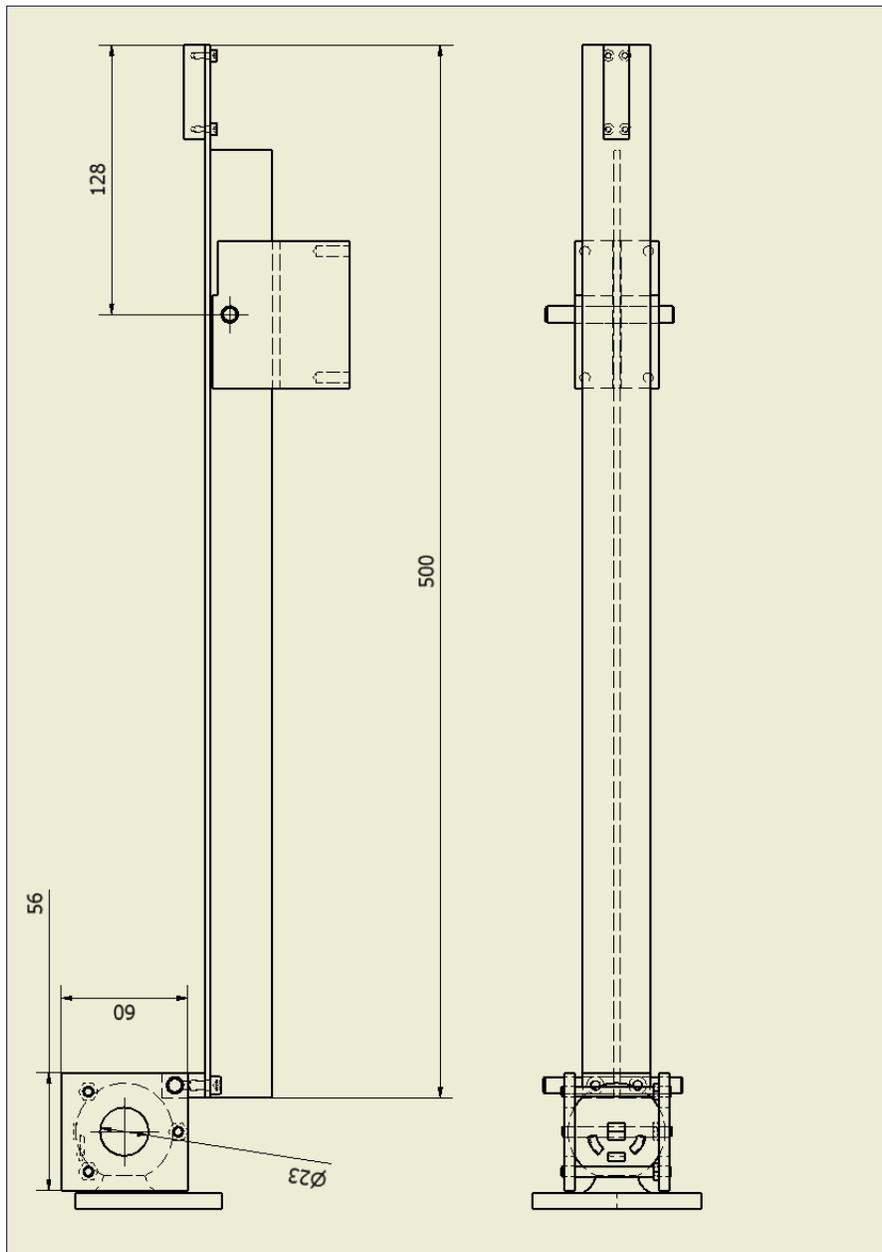
- changez de boule sur le joystick (une petite tirette permet de l'enlever facilement)
- ouvrez le protocole de test du joystick (C:\Program Files\Novint\Falcon\TestUtilities\FalconTest)
- Cliquez sur Open, pour lancer le protocole de test
- Dans la fenêtre Homing, cliquez sur Home, puis faites faire à la boule des allers-retours
- Les 3 "Motor" doivent devenir verts. Si c'est le cas, rebrancher la boule de la touche, tous doit fonctionner. Si un ou plusieurs "Motor" reste(nt) rouge, le joystick ne fonctionne plus...

E Annexe : plans du fac-similé de la touche d'expression



Toutes les valeurs sont en mm.

F Annexe : plans du bras de levier



Toutes les valeurs sont en mm.

G Annexe : valeurs numériques utilisées pour le modèle mécanique

$$L = 0,122\text{m}$$

$$l = 12.10^{-3}\text{m}$$

$$E_{acier} = 2.10^{11}\text{Pa, pour les calculs de } v_A \text{ et } v_B$$

$$b = 17,6.10^{-3}\text{m}$$

$$h = 3,5.10^{-4}\text{m}$$

$$l_2 = 0,07\text{m}$$

$$l_1 = d = 0,04\text{m}$$

$$e = 0,110\text{m}$$

$$E_{sphere} = 20.10^3\text{Pa (pour information, } E_{cuir} = 150.10^6\text{Pa. Notre choix se rapproche plutôt du cartilage } E_{cartilage} = 24.10^3\text{Pa)}$$

$$\nu = 0,3 \text{ (coefficient de Poisson de l'acier, valeur prise par défaut)}$$

$$R = 0,011\text{m (le diamètre du sac étant de } 0,022\text{m)}$$

H Annexe : vitesse d'exécution du programme de simulation selon les caractéristiques de l'ordinateur utilisé

Le programme de simulation des Ondes Martenot a été exécuté sur trois machines différentes. Le joystick fonctionnant au sein d'une boucle de soumission, on a mesuré le temps que dure chaque boucle dans ces différents cas, pour voir si le rafraichissement est suffisamment court pour rivaliser avec les sensations humaines.

Ordinateur de bureau

Système d'exploitation : Windows XP Pro

Intel(R) Pentium(R) 4 CPU 3,20GHz

1,99Go de RAM

Durée de la boucle : 10,5ms

Ordinateur (portable) de mesure du LAM

Système d'exploitation : Windows XP Pro

Inter(R) Core(TM)2 Duo CPU T9550 @ 2,66GHz et 2,66GHz

3,48Go de RAM

Durée de la boucle : 40ms

Ordinateur de bureau récent

Système d'exploitation : Windows 7 Pro

Intel(R) Xeon(R) CPU E5620 @ 2,40GHz et 2,40GHz

8,00 Go de RAM

Durée de la boucle : 2ms

On a donc décidé d'utiliser ce dernier ordinateur pour la simulation. En effet, 2ms est un peu plus rapide que les sensations humaines, de l'ordre de 3 à 5ms en force.