

Etude expérimentale du pincement d'une corde de harpe

D. Chadeaux¹, J.-L. Le Carrou¹, K. Buys¹, B. Fabre¹, L. Daudet²,

¹ LAM - Institut Jean le Rond d'Alembert - UPMC Univ. Paris 6 - UMR CNRS 7190

² Institut Langevin (LOA) - Université Paris Diderot - Paris 7 - UMR CNRS 7587

Une part importante de la signature sonore de chaque instrumentiste provient de son geste musical (conduite de l'archet, configuration du conduit vocal,...). Jusqu'à présent, les études portant sur cette notion d'identité sonore se sont essentiellement déroulées dans le contexte des instruments à sons entretenus (violon, clarinette, ...). Néanmoins, d'après les musiciens, ce phénomène de signature acoustique se vérifie également dans le cadre des instruments à cordes pincées. Cela signifie que les conditions initiales imposées à la corde lors du pincement sont spécifiques à chaque instrumentiste ou technique de jeu, les rendant alors reconnaissables. L'objectif du travail présenté ici est d'analyser expérimentalement des pincements de corde de harpe effectués dans diverses techniques instrumentales.

Les images de l'interaction entre l'instrument et le musicien, obtenues à l'aide d'une caméra rapide, donnent accès aux déplacements et rotation du doigt et de la corde au cours du mouvement. Ils permettent alors de déterminer les conditions initiales de la corde au début des oscillations. Ces résultats, associés à une étude de la vibration de la table d'harmonie, mettent en avant le fait que les conditions initiales données à une corde de harpe s'éloignent de celles appliquées à une corde pincée idéale. En effet, il apparaît que l'instrumentiste impose à la corde une vitesse non négligeable tout en la lâchant proche de sa position au repos.

1 Introduction

Une part importante de la signature sonore de chaque instrumentiste, c'est-à-dire la spécificité de leur production, prend son origine dans son geste musical. Dans le cadre des instruments à cordes pincées, cela signifie que les conditions initiales imposées à la corde au cours de la phase de pincement sont particulières au contexte de jeu (technique, nuance, type de corde), rendant reconnaissables à la fois la technique employée et le musicien.

Des études de pincements de corde ont d'ores et déjà été menées dans le cadre de la harpe [1, 2] et de la guitare [3] par le biais de modèles mécaniques d'interaction entre le doigt et la corde. Les études préliminaires sur la harpe ont mis en avant la particularité de ce pincement [4]. En effet, contrairement à la guitare, le contact avec la corde se fait au niveau de la pulpe sans que l'ongle n'intervienne. Ces études ont ainsi décrit les étapes successives du pincement :

- La phase d'adhérence où le doigt est en contact avec la corde : à partir de l'instant t_a ;
- La phase de glissement de la corde sur le doigt : à partir de l'instant t_g ;
- La phase d'oscillations libres : à partir de l'instant t_l .

Ces travaux se sont focalisés sur les paramètres mécaniques du doigt lors de la phase d'adhérence et peu sur les conditions initiales de la corde lors du lâcher. Pourtant, les conditions initiales imposées peuvent avoir d'importantes conséquences sur le spectre de la vibration. En effet, les comportements spectraux observés dans le cas d'une corde pincée (condition initiale en

déplacement et vitesse nulle) ou d'une corde frappée (condition initiale en vitesse et déplacement nul) sont considérablement différents. [5, 6]. La présente étude des conditions initiales de la corde de harpe posera ainsi la question de son appartenance à l'une ou l'autre de ces familles par le biais de confrontations de données expérimentales.

Après une description du dispositif expérimental et du protocole mis en place, les résultats obtenus seront présentés puis discutés.

2 Dispositif expérimental

2.1 Montage

Les séances de mesures ont lieu dans un endroit calme et isolé où il est demandé à des harpistes de jouer une à plusieurs cordes d'une harpe de concert (modèle Atlantide Prestige de la marque CAMAC harps) positionnée debout et non basculée sur l'épaule comme usuellement pratiqué (figure 1). Ces exécutions sont filmées à l'aide d'une caméra rapide (Phantom v5.1). Le choix d'une caméra rapide est justifié par la particularité des mouvements étudiés ainsi que par la durée d'un pincement de corde : de l'ordre de 200ms. Elle est positionnée face au plan des cordes de l'instrument donnant ainsi accès aux déplacements suivant les deux directions du plan dans lequel le mouvement s'effectue, de manière directe pour la première et grâce à un miroir disposé à 45° du plan des cordes pour la seconde (figure 1). L'acquisition se fait à une cadence de 5037 images par seconde pour des dimensions de 480x616 pixels. Un exemple d'image ainsi obtenue est présentée figure 2.

La vibration de la table d'harmonie de l'instrument est enregistrée lors de chaque exécution par le biais d'un accéléromètre PCB modèle M352C65 (2g) (figure 1). Celui-ci est disposé au pied de la corde 17 à l'arrière de la table d'harmonie, évitant ainsi de gêner le musicien lors de son exécution.

La mesure du déplacement du doigt (l'index de la main droite) se fait à l'aide de la caméra rapide. La trajectoire du doigt au cours du mouvement est assimilée à celle de son extrémité, voire de l'ongle, c'est-à-dire un point fixe qui ne subit pas de déformation pendant le pincement. Il s'agit en quelque sorte de la consigne du musicien. Un système de marquage est préalablement installé (figure 2), facilitant l'extraction du mouvements par une méthode de traitement d'images. Celle-ci est explicitée à la section 3.

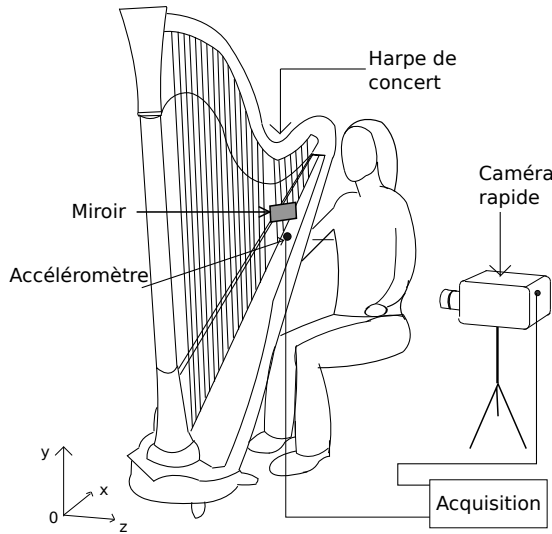


FIG. 1: Présentation du dispositif expérimental

Le déplacement de la corde est quant à lui obtenu de manière identique à celui du doigt. Sa rotation lors du pincement est également mesurée. Elle est déduite du mouvement d'une tête d'épingle solidaire de la corde (figure 2).

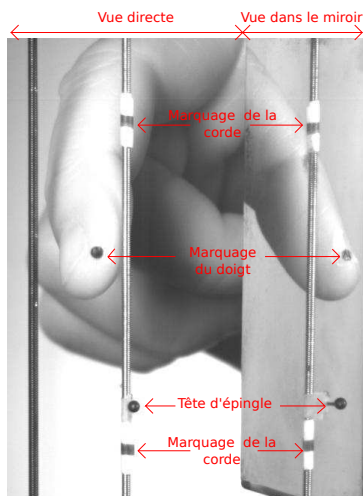


FIG. 2: Exemple d'image obtenue à la caméra rapide

2.2 Protocole de mesures

Dans l'optique d'avoir un panel varié de pincements suivant plusieurs contextes de jeu, les instrumentistes sont amenés à jouer dans trois cadres musicaux différents : des répétitions d'accords, d'arpèges et enfin de notes isolées. De plus, chacune de ces séries est interprétée dans différentes nuances de jeu allant du *piano* au *forte*.

Les données expérimentales relevées concernent deux cordes de matériaux et diamètres différents :

- La corde 29, en boyau, correspondant au Mib_2 , d'un diamètre de 1.9mm et d'une fréquence fondamentale de 155 Hz ;
- La corde 34, filée, correspondant au $Solb_2$, d'un diamètre de 1.6mm et d'une fréquence fondamentale de 92 Hz.

Afin d'estimer les caractères individuels ainsi que ceux partagés par les musiciens, quatre harpistes de niveaux différents (deux professeurs de harpe et deux amateurs) participent aux séances de mesures.

3 Traitement d'images

L'extraction des trajectoires du doigt, de la corde, et de l'aiguille se fait à l'aide d'un code de détection d'objet appliqué à chaque marquage (figure 2).

Le principe général du traitement d'images appliqué ici est décrit figure 3. Des modèles de référence sont définis pour chaque marque à la première image du film. Ces modèles sont ensuite recherchés dans l'image suivante autour d'une zone déterminée par l'emplacement précédemment trouvé de la marque, sa vitesse maximale et la résolution de l'acquisition. Cette méthode nécessite principalement deux étapes.

La première consiste à retrouver ledit modèle dans la zone cible par un algorithme de block matching [7]. Pour se faire, la valeur maximale d'une corrélation croisée entre le modèle et la zone cible est recherchée. Ce résultat n'étant précis qu'au pixel, une seconde étape de détection d'objets par segmentation est instaurée pour affiner le résultat. En effet, si un objet vient à se déplacer successivement de moins d'un pixel dans l'image, le modèle nouvellement redéfini ne correspondra plus à l'original.

La seconde étape vise donc à valider le contenu de la zone définie. Elle se déroule grâce à une méthode de détection de contour par l'algorithme de segmentation proposé par Chan et Vese [8, 9]. Cet algorithme compare l'énergie à l'intérieur et à l'extérieur d'une frontière déterminée dans la zone cible de l'image. En fonction du résultat obtenu, cette frontière est alors redéfinie et le processus répété récursivement de manière à converger autour de l'objet désiré. Le centre de la zone ainsi trouvée est la position de l'objet étudié à l'image courante.

4 Etude expérimentale

Les séances de mesures effectuées dans le cadre de l'étude ici présentée donnent lieu à 25 acquisitions par

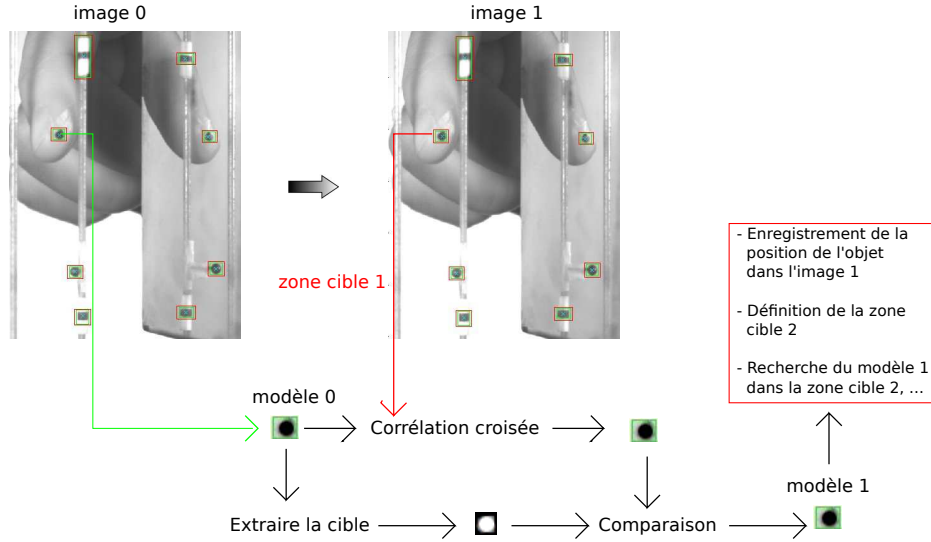


FIG. 3: Fonctionnement du code de suivi d'objets

harpiste dans différents contextes musicaux. Leurs analyses montrent des tendances répétables spécifiques aux contextes de jeu.

Les résultats exposés aux paragraphes suivants proviennent d'un pincement particulier de la corde de Mib_2 par un seul harpiste. Ils sont issus d'un arpège joué *piano* dont la note désirée a été ensuite isolée. Ce choix est motivé par l'aspect représentatif de ce pincement en regard des autres extraits d'arpège interprétés par ce même instrumentiste.

Dans la suite de cette partie, les résultats obtenus par l'intermédiaire des mesures des trajectoires de la corde et du doigt lors du pincement ainsi que des signaux accélérométriques de la table d'harmonie sont décrits puis interprétés.

4.1 Mesures de déplacements

La figure 4 représente les trajectoires du doigt et de la corde lors d'un pincement dans le plan (xOz) par un instrumentiste professionnel. Il s'agit donc d'une vue du dessus de la harpe. Notons que la courbe bleue a été translatée d'un diamètre de corde pour éviter la superposition des deux tracés et faciliter la lecture. La figure 5 quant à elle propose une représentation de la rotation de corde imposée par le doigt au cours des deux phases de pincement (adhérence puis glissement).

Lors de la phase d'adhérence ($\forall t \in [t_a; t_g]$), le doigt emmène tout d'abord la corde jusqu'à une position maximale suivant les deux axes de déplacement avant de la relâcher suivant l'axe x . La similarité des deux profils de déplacement durant l'adhérence est globalement bien vérifiée. Néanmoins, des différences apparaissent (figure 4, encadrés noirs), s'expliquant par les mouvements du doigt s'enroulant autour de la corde. Il lui applique alors une torsion allant jusqu'à une dizaine de degrés qui se retrouve effectivement dans son profil de rotation figure 5.

La phase de glissement ($\forall t \in [t_g; t_l]$) est plus courte que celle d'adhérence : 2 ms par rapport à 206 ms précédemment. Elle est caractérisée par les directions opposées que prennent le doigt et la corde.

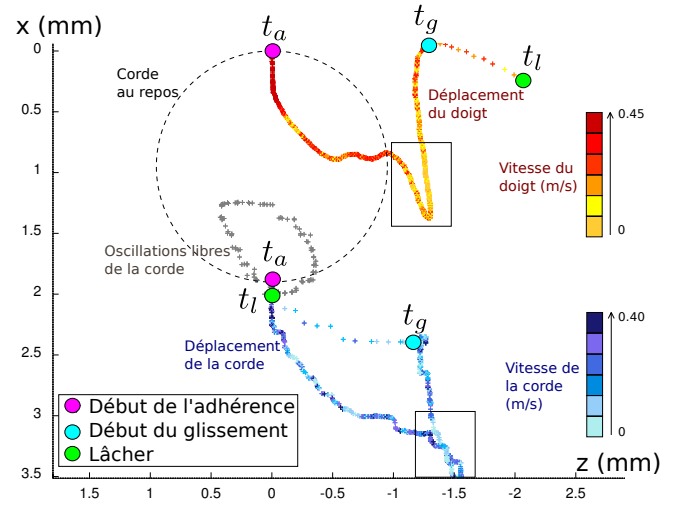


FIG. 4: Déplacements de la corde et du doigt dans le plan de pincement

Au lâcher, le contact entre le doigt et la corde cesse. Cette dernière apparaît être à une distance très faible (environ 5% du diamètre) de la position à laquelle a débuté son mouvement. A ce même instant, l'angle parcouru depuis le début du mouvement par la corde approche des 4° . De même, sa vitesse est non nulle. Elle est de l'ordre de 400 mm.s^{-1} , valeur comparable à sa vitesse maximale lors de la phase d'oscillations libres qui est d'environ 500 mm.s^{-1} . Il semble donc que la corde possède une condition initiale non négligeable en vitesse alors que celle en position apparaît proche des conditions au repos.

4.2 Mesures accélérométriques

Les conditions initiales de la corde à l'instant du lâcher influent sur la vibration de la table d'harmonie de l'instrument. C'est pour cette raison que l'étude des signaux accélérométriques est réalisée.

Du fait de la présence de marqueurs sur la corde 29, le signal vibratoire est altéré, rendant alors son exploitation impossible. C'est pourquoi les mesures vibratoires

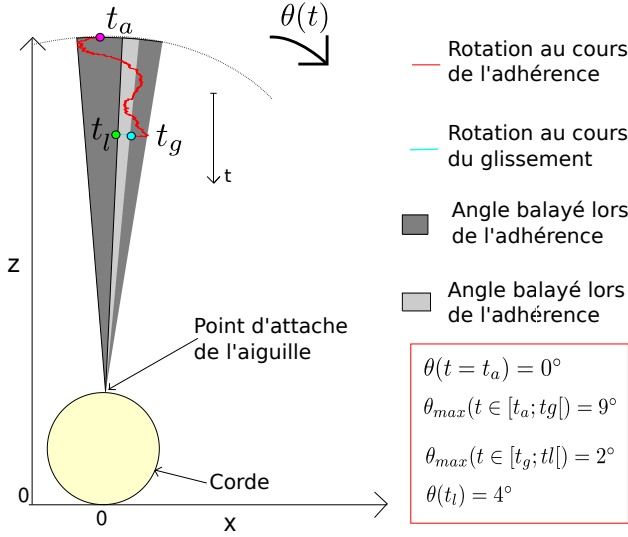


FIG. 5: Torsion de la corde lors du pincement

exposées ci-après proviennent uniquement de la corde 17, correspondant à un Do_4 .

La figure 6 représente l'évolution du signal vibratoire de la table d'harmonie après avoir joué de manière isolée et à la nuance *piano* la note de Do_4 . Une forme d'onde classique y est observée. La figure 7 représente quant à elle le spectre de quelques oscillations de la vibration, représentées en rouge figure 6.

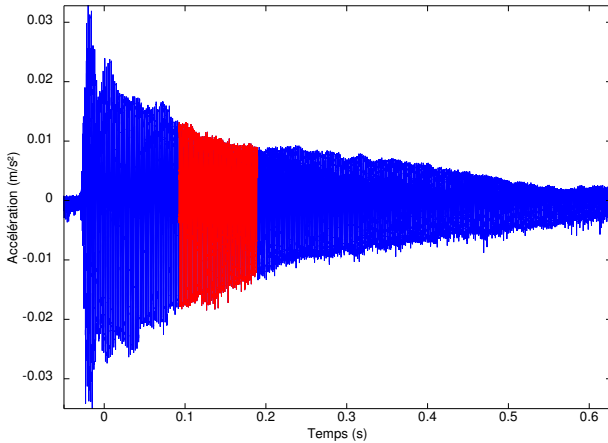


FIG. 6: Signal d'accélération de la table d'harmonie

La décroissance observée de l'amplitude des harmoniques du spectre est de l'ordre de -40 dB/dec , c'est-à-dire inversement proportionnelle au carré de la fréquence.

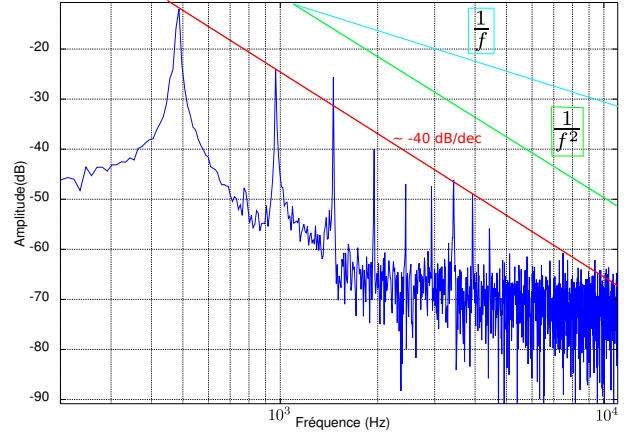


FIG. 7: Spectre d'un extrait du signal vibratoire de la table d'harmonie

4.3 Discussion

Afin d'interpréter les résultats précédents, les oscillations libres d'une corde de longueur L , parfaitement flexible et fixée à ses deux extrémités sont étudiées.

En exprimant le nombre d'onde $k_n = \frac{n\pi}{L} \forall n \in \mathbb{N}$, avec la relation de dispersion $\omega_n = k_n c$, et en omettant le terme de décroissance, la solution du déplacement de la corde est la suivante [6] :

$$x(y, t) = \sum_{n \in \mathbb{N}} \sin(k_n y) (A_n \cos(\omega_n t) + B_n \sin(\omega_n t)). \quad (1)$$

Les conditions initiales de la corde donnent accès aux coefficients A_n et B_n . Il s'agit en effet de leurs projections sur les déformées modales (Φ_n) de la corde exprimées comme suit :

$$A_n = \langle y(x, 0), \Phi_n \rangle = \frac{2}{L} \int_0^L x(y, 0) \sin(k_n y) dy, \quad (2)$$

et

$$B_n = \langle v_y(x, 0), \Phi_n \rangle = \frac{2}{\omega_n L} \int_0^L v(y, 0) \sin(k_n y) dy, \quad (3)$$

où $\langle f, g \rangle$ est le produit scalaire des deux fonctions f et g .

En considérant dans un premier temps le cas d'une corde pincée, les conditions initiales classiquement attribuées sont une vitesse nulle, donnant directement $B_n = 0$, et un déplacement initial non nul. Cette déformée à l'instant de lâcher est représentée figure 8 pour une corde parfaitement souple, impliquant les conditions initiales en déplacement suivantes :

$$\forall y \in [0; y_0] \quad x(y, 0) = \frac{x_0}{y_0} y, \quad (4)$$

et

$$\forall y \in [y_0; L] \quad x(y, 0) = \frac{x_0}{L - y_0} y. \quad (5)$$

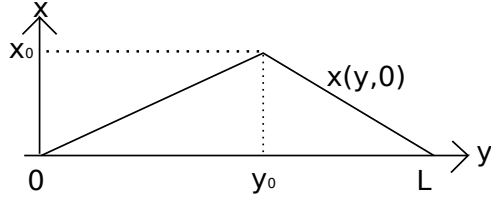


FIG. 8: Déformée initiale d'une corde pincée parfaitement flexible

En réinjectant les expressions (4) et (5) dans l'équation (2), le coefficient A_n et donc l'expression de la déformée de la corde à tout instant sont obtenus [10] :

$$x(y, t) = \frac{x_0 L}{y_0(L - y_0)} \sqrt{\frac{2}{L}} \sum_{n \in \mathbb{N}} \frac{\sin(k_n y_0) \sin(k_n y)}{k_n^2} \cos(\omega_n t). \quad (6)$$

Afin de relier ce résultat aux mesures accélérométriques précédentes (section 4.2), il convient d'exprimer la composante transversale appliquée par la corde sur la table d'harmonie [10]. En notant T la tension de la corde, celle-ci s'exprime :

$$f(t) = T \left. \frac{\partial x(y, t)}{\partial y} \right|_{y=0}, \quad (7)$$

soit,

$$f(t) = \frac{x_0 L T}{y_0(L - y_0)} \sqrt{\frac{2}{L}} \sum_{n \in \mathbb{N}} \frac{\sin(k_n y_0)}{k_n} \cos(\omega_n t). \quad (8)$$

L'expression de la force exercée sur la table d'harmonie par la corde est donc proportionnelle à $\frac{1}{n}$. Ceci implique la même dépendance pour l'accélération de la table et donc une décroissance de son spectre de vibration en $\frac{1}{f}$.

Dans un second temps, des calculs similaires peuvent être effectués pour une corde frappée. Dans ce cas, les conditions initiales sont nulles en déplacement ($A_n = 0$) et une vitesse initiale non nulle. Par analogie avec le cas précédent, en posant une vitesse initiale de la corde v_0^x et $R = \sqrt{\frac{2}{L}} \frac{v_0^x L}{y_0(L - y_0)}$, l'expression de la vitesse de la corde est alors :

$$v(y, t) = R \sum_{n \in \mathbb{N}} \frac{\sin(k_n y_0) \sin(k_n y)}{k_n^2} \cos(\omega_n t). \quad (9)$$

La déformée de la corde et enfin la force exercée sur la table d'harmonie s'en déduisent immédiatement :

$$x(y, t) = \frac{R}{c} \sum_{n \in \mathbb{N}} \frac{\sin(k_n y_0) \sin(k_n y)}{k_n^3} \sin(\omega_n t), \quad (10)$$

et

$$f(t) = \frac{R}{c} \sum_{n \in \mathbb{N}} \frac{\sin(k_n y_0)}{k_n^2} \sin(\omega_n t). \quad (11)$$

Ainsi, dans le cas des instruments à cordes frappées, l'amplitude des partiels de l'accélération de la table d'harmonie décroît en $\frac{1}{n^2}$, équivalent à une décroissance de son spectre en $\frac{1}{f^2}$.

Les résultats expérimentaux exposés au cours de la section 4.2 montrent une tendance de l'amplitude des premiers harmoniques du spectre à décroître proportionnellement à $\frac{1}{f^2}$ (figure 7). D'après les éléments

théoriques ci-dessus, la corde de harpe semble donc lâchée par le musicien avec une vitesse initiale non négligeable ($B_n \neq 0$) mais un déplacement faible ($A_n \sim 0$). De plus, l'étude centrée sur les déplacements et rotation de la corde et du doigt a indiqué des vitesses initiales de corde non nulles pour des déplacements initiaux faibles. Ceci correspond également à un lâcher plutôt en vitesse qu'en position. D'un point de vue uniquement mécanique et non organologique, la harpe est ainsi plus proche d'un instrument à cordes frappées que d'un instrument à cordes pincées.

5 Conclusion

Au cours de cette étude, les conditions initiales de la corde de harpe à l'instant de son lâcher ont été analysées de manière expérimentale. Le dispositif mis en place permet l'étude des mouvements du doigt et de la corde suivant les trois axes de l'espace. Deux seuls sont suffisants ici car le geste du musicien se fait dans un plan perpendiculaire aux cordes. La vibration de la table d'harmonie est également acquise.

Les mesures ainsi réalisées montrent que le geste de l'instrumentiste s'avère répétable dans une configuration de jeu précise. Elles indiquent également qu'au point d'excitation, à l'instant du lâcher, la corde est presque revenue à sa position au repos mais possède par contre une vitesse non négligeable. Ce comportement typique des instruments à cordes frappées rapproche la harpe, pourtant usuellement associée aux cordes pincées, de cette famille.

En perspectives de cette étude, l'étude de la notion de rotation initiale de la corde à son lâcher ainsi que la généralisation à des panels plus importants et donc représentatifs de musiciens, de cordes ainsi que de contextes musicaux de jeu sont à venir. Des indicateurs permettant de discriminer un harpiste professionnel d'un amateur ou encore une technique ou nuance de jeu pourront alors être définis.

Enfin, pour prolonger cette étude, une modélisation mécanique de l'action du doigt sur la corde de harpe aidera à mieux comprendre l'interaction entre le harpiste et son instrument. En utilisant les données expérimentales présentées dans cet article et par inversion du modèle, il est envisagé de pouvoir mettre en exergue les paramètres mécaniques spécifiques de l'interprète et de son jeu.

Remerciements

Les auteurs remercient Laurent Quartier pour son aide lors de la mise en place du montage, ainsi que les harpistes ayant participé à cette étude : Marie Denizot, Pierrine Didier, Marie Klein et Sandie Leconte.

Références

- [1] J-L Le Carrou, E. Wahlen, E. Brasseur, J. Gilbert, Two dimensional finger-string interaction in the concert harp, Acoustics2008, Paris, 2008

- [2] J-L Le Carrou, F. Gautier, F. Kerjan, J. Gilbert, The finger-string interaction in the concert harp, ISMA, Barcelone, 2007
- [3] M. Pavlidou, A physical model of the string-finger interaction on the classical guitar, PhD thesis, University of Wales, Cardiff, 1997
- [4] J-L Le Carrou, Vibro-acoustique de la harpe de concert, Mémoire de thèse, Université du Maine, Le Mans, 2006
- [5] N. H. Fletcher and T. D. Rossing, The Physics of Musical Instruments. Springer, New York, United States of America, 2nd edition, 1998.
- [6] A. Chaigne, J. Kergomard, Acoustique des instruments de musique, Belin, 2008.
- [7] S.A. El-Azim, An efficient object tracking technique using block-matching algorithm, Radio Science Nineteenth National Conference of the Proceedings of NRSC Alexandria, Egypt, 2002
- [8] T.F. Chan, L.A. Vese, Active contours without edges, IEEE Transactions on image processing, vol 10, no 2, 2001
- [9] Shawn Lankton, Region Based Active Contour Segmentation, www.shawnlankton.com, 2009
- [10] C. Valette, C. Cuesta. Mécanique de la corde vibrante, Hermès, Paris, 1993.