

CFA/VISHNO 2016

Etude du jeu du harpiste

J.-L. Le Carrou^a, M. Pàmies-Vilà^a et D. Chadeaux^b

^aSorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, CNRS, LAM / d'Alembert, 4 place
Jussieu, 75005 Paris, France

^bUniversité d'Aix-Marseille, Institut des sciences du mouvement, avenue de Luminy,
13288 Marseille, France
jean-loic.le_carrou@upmc.fr



LE MANS

Au cours de la phase d'apprentissage de leur instrument, les musiciens développent une expertise gestuelle importante. Celle-ci leur permet d'exécuter avec une grande précision le mouvement nécessaire à la production sonore désirée. Dans le cadre des instruments à cordes pincées, l'instrumentiste amène la corde vers un état particulier définissant ses oscillations libres futures. Dans le cadre de travaux récents sur la harpe de concert, nous avons montré que, lors du jeu en accord ou en arpège, ces conditions initiales de vibrations de la corde sont caractéristiques du musicien, particulièrement répétables et dépendant de la technique de jeu. Pour étendre ces résultats à un contexte de jeu plus réaliste, nous avons développé un protocole expérimental couplé à une analyse des données qui permet de mesurer de manière synchrone les paramètres d'interaction du harpiste sur six cordes de l'instrument, la cinématique de ses membres supérieurs et le son de l'instrument. Les résultats obtenus sur une dizaine de harpistes, jouant un morceau imposé, confirment la capacité de l'instrumentiste à reproduire un geste et montrent, notamment, l'adaptation du geste au contexte musical, à la corde jouée, et au doigt utilisé.

1 Introduction

La harpe de concert telle que nous la connaissons aujourd'hui est apparue au cours de la première moitié du 18^{ème} siècle dans le sud de l'Allemagne. Au fur et à mesure de ses évolutions, elle a vu sa caisse de résonance et sa table d'harmonie se rigidifier pour soutenir un nombre de cordes croissant et une contrainte mécanique de plus en plus élevée [1]. L'étude des impédances caractéristiques et des tensions des cordes de harpe indiquent qu'elle se situe à la frontière entre les instruments à cordes mises en vibration par le doigt et ceux où un élément intermédiaire (e.g. plectre ou marteau) est nécessaire [2]. En conséquence, la pratique de la harpe peut susciter des troubles articulaires chez les instrumentistes [3]. Les caractéristiques mécaniques de la harpe requièrent alors de l'instrumentiste qu'il déploie une gestuelle adaptée tant à la production de la sonorité désirée, qu'à la limitation des risques cliniques sous-jacents. Lors de précédents travaux, nous avons analysé le geste producteur de son d'une part (analyse du pincement d'une corde dans deux contextes musicaux à l'aide d'une caméra rapide [4]), et les gestes accompagnateurs de la performance d'autre part (analyse cinématique et dynamique du jeu à l'aide d'un système de caméras infrarouges [4]). Ainsi, nous avons montré que lors du jeu en accords ou en arpèges, les conditions initiales de vibrations de la corde sont caractéristiques du musicien, particulièrement répétables et dépendantes de la technique de jeu [4, 5]. Quant à la posture de l'instrumentiste, elle s'avère stable au cours du jeu, les mouvements de la main participant à l'interprétation musicale de la partition jouée, et les moments nets aux articulations augmentant du poignet vers les épaules [6, 7]. Toutefois, ces études étant découplées et focalisées sur un nombre restreint de conditions de jeu, elles nécessitent d'être mises en oeuvre simultanément sur un plus large panel de contextes musicaux. L'objectif de la présente étude est ainsi d'étendre ces résultats à un contexte de jeu plus réaliste pour plusieurs cordes de tension et de matériau différents. En particulier, nous nous intéresserons ici à l'influence des propriétés des cordes sur le jeu de l'instrumentiste du point de vue de la cinématique des membres supérieurs et du pincement.

2 Méthodes

2.1 Protocole expérimental

Douze harpistes ont participé à cette étude. Il leur a été demandé d'interpréter la variation six de la *Gimblette* de B. Andrès, à un tempo imposé de 110 bpm, sur une

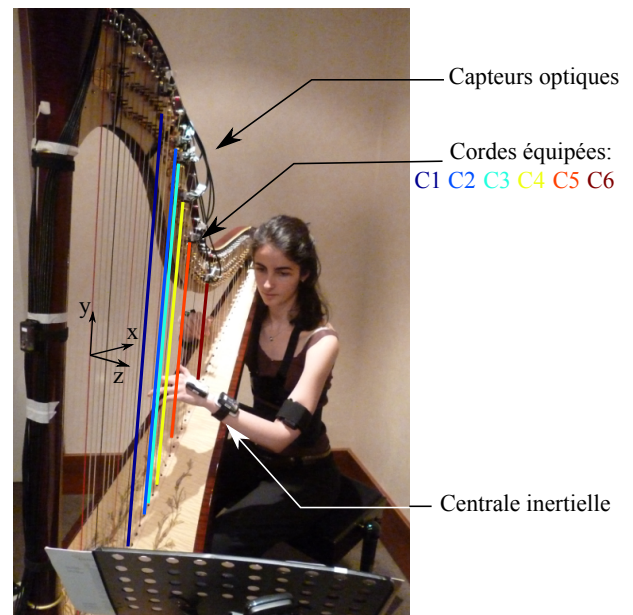


FIGURE 1 – Protocole Expérimental montrant les 6 cordes instrumentées et les balises inertielles placées sur la harpiste.

harpe de concert Camac Atlantide Prestige. Le protocole de mesures, présenté figure 1, a consisté à capter de manière synchrone les trajectoires de six cordes de l'instrument, la cinématique des membres supérieurs des harpistes, ainsi que la performance globale par le biais de mesures acoustiques (Schoeps CMC6 + MK6) et de vidéos sous trois angles de vue différents. Les trajectoires de chaque corde étudiée suivant les axes X et Z ont été déterminées à l'aide de deux capteurs optiques orthogonaux directement fixés sur la console [8]. Leurs positionnements ont été choisis de telle sorte à ne pas gêner l'instrumentiste dans son jeu tout en ayant la meilleure dynamique possible par capteur [8, 9]. Le choix des cordes captées permet de représenter la diversité des matériaux (cordes filées en acier, boyau et nylon), des tensions (de 706 N à 127 N) et des longueurs (de 1.17 m à 0.33 m) du cordage d'une harpe de concert. Les caractéristiques détaillées de ces cordes sont proposées dans le tableau 1. La cinématique des harpistes a quant à elle été mesurée par le biais de sept centrales inertielles (T-sens Captiv Motion, 64 Hz) disposées sur leurs poignets, avant-bras, bras, et dos, préalablement calibrées.

TABLEAU 1 – Fréquence fondamentale (f_0), Tension (T) et matériau (A : Acier, B : Boyau, N : Nylon) des cordes étudiées.

	Numéro des cordes					
	1	2	3	4	5	6
Note	Sol _b 1	Ré _b 2	Mi _b 2	Sol _b 2	Do _b 3	Do _b 4
f_0 (Hz)	92	138	155	185	247	494
T (N)	706	294	303	238	173	127
Matériau	A	B	B	B	B	N

2.2 Identification du pincement

Lors de la mise en vibration d'une corde de harpe, trois phases ont été identifiées : l'accroche, le glissement, et les oscillations libres de la corde, débutant respectivement aux instants notés t_c , t_s , et t_r [4]. Dans le but de déterminer l'état de la corde à t_r , les signaux issus des capteurs optiques positionnés sur la console de l'instrument sont traités suivant la procédure explicitée ci-après, qui a été validée par comparaison avec une mesure directe du déplacement de la corde au point de pincement par caméra rapide [10]. Après une segmentation fondée sur le seuillage de l'énergie du signal [11], les signaux sont calibrés [8]. La détection du point de pincement est ensuite effectuée par l'analyse des premières réflexions de la corde à ses extrémités, vues au niveau des capteurs optiques [12]. L'inversion d'un modèle modal conservatif d'une corde aux conditions aux limites fixe-fixe permet enfin d'identifier le déplacement de la corde en son point de pincement. Cette étape, pouvant s'avérer délicate, nécessite un filtrage passe-bas du déplacement final [10]. Cette procédure permet également de déterminer les instants caractéristiques t_c , t_s , et t_r . Ainsi, il est finalement possible d'accéder à la position et à la vitesse de la corde à t_r au point de pincement, et de définir son état au début de ses oscillations libres.

2.3 Descripteurs cinématiques

Les mouvements fonctionnels (présentés dans le tableau 2) des membres supérieurs de six harpistes sont étudiés en fonction des cordes jouées pour les pincements effectués avec l'index, le majeur et l'annulaire des deux mains. Pour cela, les signaux mesurés sont segmentés sur chaque pincement par le biais de la méthode présentée section 2.2. Leur amplitude ainsi que leurs valeurs à t_c et t_r du pincement sont ensuite estimées pour chaque pincement.

Pour chaque harpiste, les valeurs moyennes de chaque descripteur défini ont été calculées sur les pincements étudiés. Des analyses de la variance à un facteur (corde) et mesures répétées ont été effectuées. Lorsqu'un effet significatif ($p < 0.05$) a été observé, un test de Tukey a permis de déterminer les différences significatives entre conditions.

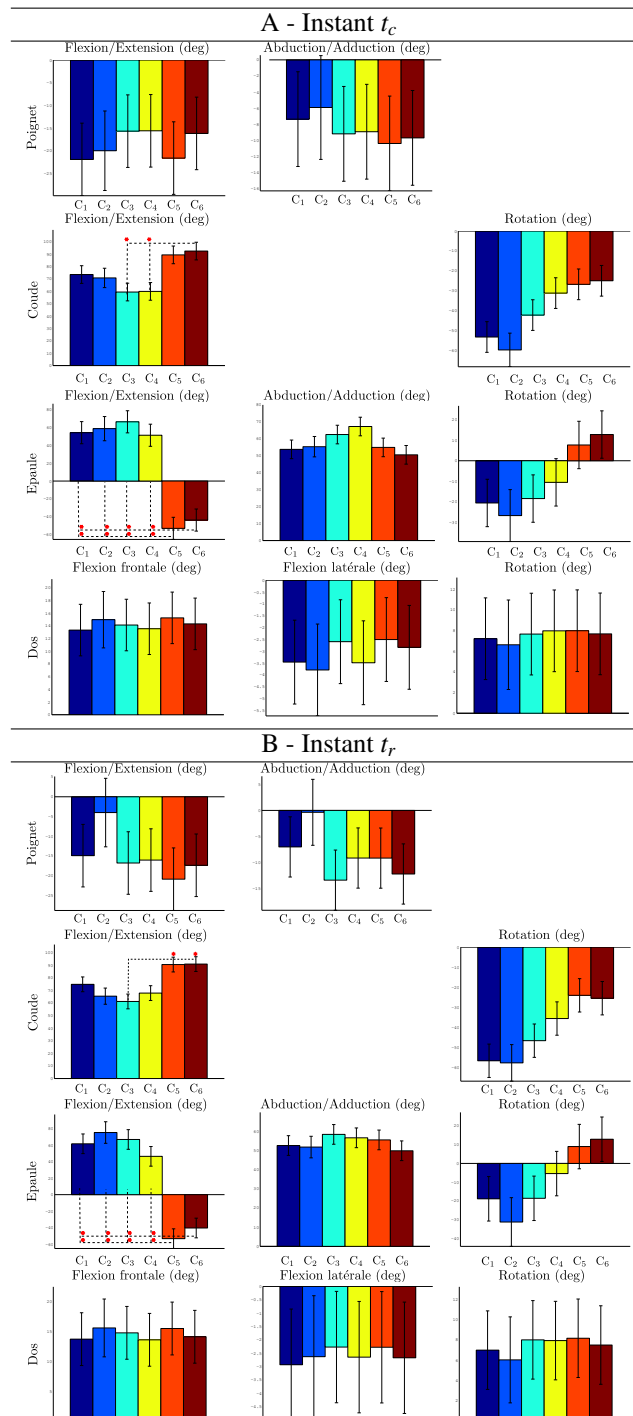


FIGURE 2 – Valeurs des mouvements fonctionnels du poignet, du coude, de l'épaule, et du dos au premier instant t_c (A) et à l'instant de lâcher t_r (B) du pincement des cordes C1.6. Les étoiles (*) indiquent les différences significatives entre les conditions étudiées ($p < 0.05$). Les valeurs positives correspondent à la flexion et l'abduction du poignet, à la flexion et la rotation externe du coude, à la flexion horizontale, l'abduction, et la rotation externe de l'épaule, et à la flexion frontale du dos vers l'avant, à la flexion latérale et la rotation du dos vers la droite.

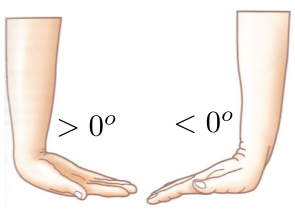
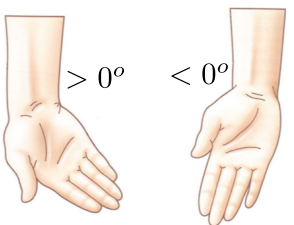


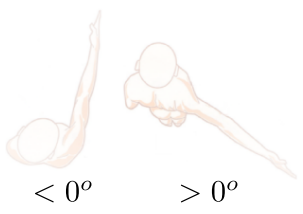
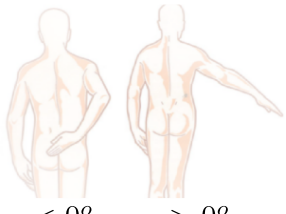


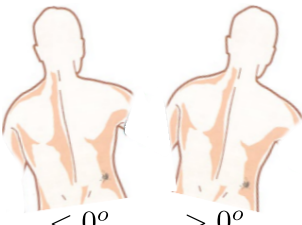
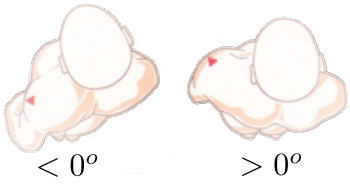
Poignet		
		
Flexion/Extension	Abduction/Adduction	
Coude		
		
Flexion/Extension	Rotation	
Epaule		
		
Flexion/Extension horizontale	Abduction/Adduction	Rotation
Dos		
		
Flexion frontale	Flexion latérale	Rotation

TABLEAU 2 – Illustration des mouvements fonctionnels du poignet, du coude, de l'épaule, et du dos étudiés. Les valeurs positives correspondent à la flexion et l'abduction du poignet, à la flexion et la rotation externe du coude, à la flexion horizontale, l'abduction, et la rotation externe de l'épaule, et à la flexion frontale du dos vers l'avant, à la flexion latérale et la rotation du dos vers la droite. Les illustrations sont extraites de [15].

3 Résultats et discussion

3.1 Propriétés des cordes et amplitudes articulaires

Aux instants de début et de fin du pincement, le poignet du harpiste est en situation d'extension ($19^\circ \pm 8^\circ$ à t_c , et $15^\circ \pm 8^\circ$ à t_r) et d'abduction ($9^\circ \pm 6^\circ$ à t_c , et $9^\circ \pm 6^\circ$ à t_r) quelle que soit la corde considérée (voir les figures 2-(A) et 2-(B)). Si le positionnement du poignet est peu variable entre les instants t_c et t_r , la figure 3 indique que les amplitudes articulaires varient de $17^\circ \pm 4^\circ$ en flexion/extension et de $14^\circ \pm 5^\circ$ en abduction/adduction durant le pincement. Aucune différence significative entre les cordes étudiées n'apparaît à cette articulation.

Concernant l'articulation du coude, les figures 3, 2-(A) et 2-(B) indiquent que celui-ci est en flexion ($74^\circ \pm 7^\circ$ à t_c , et $75^\circ \pm 6^\circ$ à t_r) et en rotation interne ($40^\circ \pm 8^\circ$ à t_c , et $41^\circ \pm 8^\circ$ à t_r) au cours du pincement. Des différences significatives sont observées aux instants t_c et t_r . A l'instant t_c , la flexion du coude lors du pincement de la corde C_6 est significativement plus élevée que lors du pincement des cordes C_3 et C_4 ($F(5,34) = 3.92$, $p < 0.01$). A l'instant t_r , la flexion du coude lors du pincement des cordes C_5 et C_6 est significativement plus élevée que lors du pincement de la corde C_3 ($F(5,34) = 4.72$, $p < 0.01$). La rotation interne du coude apparaît quant à elle dépendante de la corde considérée ($F(5,34) = 3.3$, $p = 0.02$). Plus la corde est proche du harpiste, plus la rotation interne du coude est importante. De même que pour le poignet, si l'organisation des mouvements fonctionnels du coude est semblable aux instants t_c et t_r , elle varie entre eux. On constate en effet que la flexion du coude varie différemment au cours du pincement en fonction de la corde jouée. Les amplitudes des mouvements de flexion associés aux pincements des cordes C_5 et C_6 sont significativement plus faibles qu'au cours du pincement des cordes C_3 et C_4 ($F(5,34) = 5.52$, $p < 0.01$). En moyenne, les amplitudes de mouvement au coude durant le pincement sont de $11^\circ \pm 3^\circ$ en flexion et de $11^\circ \pm 2^\circ$ en rotation.

D'autre part, les résultats indiquent que le positionnement de l'épaule est dépendante de la corde pincée. En effet, si celle-ci est en abduction quelle que soit la corde jouée ($57^\circ \pm 6^\circ$ à t_c , et $54^\circ \pm 5^\circ$ à t_r), elle se trouve en flexion horizontale ($58^\circ \pm 13^\circ$ à t_c , et $63^\circ \pm 12^\circ$ à t_r) et en rotation interne ($19^\circ \pm 12^\circ$ à t_c , et $18^\circ \pm 12^\circ$ à t_r) lors du pincement des cordes C_1 à C_4 , et en extension horizontale ($48^\circ \pm 12^\circ$ à t_c , et $47^\circ \pm 12^\circ$ à t_r) et rotation externe ($10^\circ \pm 12^\circ$ à t_c , et $11^\circ \pm 12^\circ$ à t_r) lors du pincement des cordes C_5 et C_6 . Aussi, des différences significatives apparaissent en flexion/extension horizontale entre ces deux groupes de cordes à t_c ($F(5,34) = 19.45$, $p < 0.01$) et t_r ($F(5,34) = 22.65$, $p < 0.01$). Du point de vue de l'amplitude des mouvements de l'épaule, aucune différence significative entre les conditions de corde n'est mise en avant, et des variations de $11^\circ \pm 6^\circ$, $7^\circ \pm 4^\circ$, et $9^\circ \pm 3^\circ$ sont estimés respectivement en flexion/extension horizontale, abduction/adduction et en rotation.

Enfin, la posture du dos ne voit pas de tendance significative entre les cordes étudiées. Le dos est en flexion frontale vers l'avant ($14^\circ \pm 4^\circ$ à t_c , et $15^\circ \pm 5^\circ$ à t_r), faible flexion latérale vers la gauche ($3^\circ \pm 2^\circ$ à t_c , et $3^\circ \pm 2^\circ$ à t_r), et en rotation vers la droite ($8^\circ \pm 4^\circ$ à t_c , et

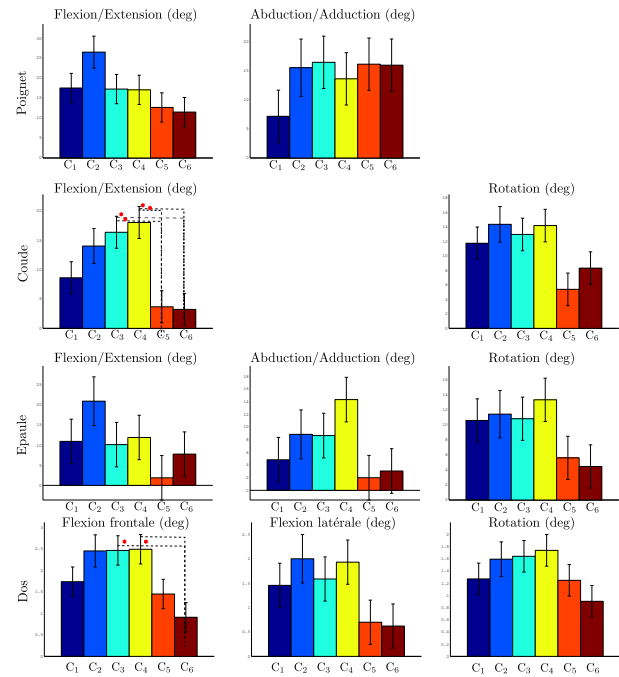


FIGURE 3 – Amplitudes des mouvements fonctionnels du poignet, du coude, de l'épaule, et du dos lors du pincement des cordes $C_{1..6}$. Les étoiles (*) indiquent les différences significatives entre les conditions étudiées ($p < 0.05$).

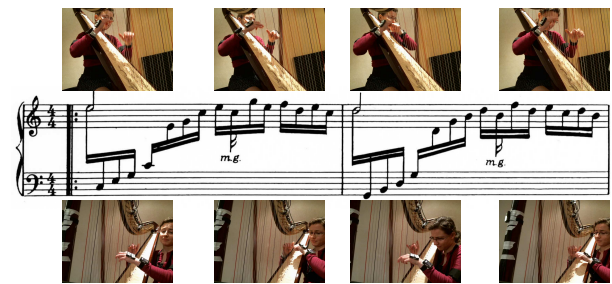


FIGURE 4 – Partition des deux premières mesures de l'extrait étudié associée à des photographies suivant deux vues d'un harpiste l'interprétant.

$7^\circ \pm 4^\circ$ à t_r). Cependant, une amplitude en flexion frontale significativement plus faible pour les cordes C_5 et C_6 que les autres est observée pendant le pincement ($F(5,34) = 3.65$, $p = 0.01$). En moyenne, entre le début et la fin du pincement, le positionnement du dos varie faiblement ($1.9^\circ \pm 0.3^\circ$ en flexion frontale, $1.4^\circ \pm 0.5^\circ$ en flexion latérale, et $1.4^\circ \pm 0.3^\circ$ en rotation).

La figure 4 présente le positionnement global d'un harpiste par rapport à l'instrument en situation de jeu. On observe ainsi les différentes postures adoptées en fonction des cordes jouées. Notamment, il apparaît que le bras gauche est principalement impliqué dans le jeu des cordes C_1 à C_4 (i.e. les cordes les plus éloignées du harpiste), alors que le bras droit est utilisé pour jouer les cordes plus proches du harpiste, C_5 et C_6 ici. Aussi, les résultats obtenus concernant les mouvements fonctionnels du harpiste en fonction des cordes jouées sont révélateurs de sa posture relativement à l'instrument. Le positionnement du buste du harpiste est stable en fonction des cordes pincées. La harpe nécessitant d'employer à la fois les membres supérieurs et inférieurs du fait des pédales, le buste du musicien peut être vu comme le segment stabilisant l'ensemble de la chaîne cinématique.

De plus, les différences observées entre les cordes jouées renseignent sur le bras impliqué dans le pincement de la corde. Du fait du positionnement de l'instrument sur l'épaule droite du harpiste, l'épaule droite a une amplitude de mouvement en flexion horizontale restreinte comparée à la gauche libre d'atteindre les cordes les plus éloignées. En conséquence, afin d'atteindre les cordes à mettre en vibration, le coude droit a une flexion plus marquée que le gauche. Considérant maintenant la cinématique de l'articulation du poignet, aucune différence remarquable n'apparaît. Une hypothèse expliquant ces résultats est que les différences cinématiques entre les membres supérieurs droit et gauche visent à compenser le déséquilibre postural induit par le positionnement asymétrique du harpiste par rapport à l'instrument. Ainsi, les mouvements fonctionnels des extrémités distales peuvent être réalisés adéquatement, qu'il s'agisse de la main droite ou gauche.

Si l'organisation relative des segments des membres supérieurs les uns par rapport aux autres apparaît directement liée à l'exécution de la partition, les amplitudes des mouvements fonctionnels durant le pincement, c'est-à-dire alors que les doigts sont en contact avec les cordes, ne sont pas négligeables. Les postures aux instants t_c et t_r étant semblables, une hypothèse est que ces mouvements aient pour but de faciliter l'interprétation de la partition par le musicien, notamment du point de vue de la gestion du rythme, correspondant alors aux gestes accompagnateurs de l'instrumentiste.

3.2 Propriétés des cordes et pincement

3.2.1 Trajectoires des cordes au point de pincement

La figure 5 présente, pour un harpiste, les trajectoires de cordes estimées au point de pincement lors de l'interprétation des deux premières mesures étudiées et une répétition. Ces trajectoires correspondent au mouvement de la corde entre les instants t_c et t_r . La comparaison des deux exécutions nous permet de confirmer la répétabilité du geste de l'instrumentiste [4]. On constate également une homothétie de certaines trajectoires, liée à un changement de nuance lors de la répétition (voir par exemple les cordes C_5 et C_6). Plus particulièrement, la trajectoire du doigt lors du pincement ne semble pas dépendre de la corde mais du doigt. En effet, le mouvement des cordes C_5 et C_4 jouées par le pouce ou encore des cordes C_4 et C_2 jouées par l'index sont semblables. Ces mouvements semblent également liés au contexte de jeu. En effet, en considérant par exemple l'exécution du Dob4 par l'index gauche, on constate deux mouvements différents lorsqu'il est joué dans un contexte de notes ascendantes (les deux premières) ou descendantes (les deux dernières).

3.2.2 Conditions initiales de vibrations

Pour huit harpistes, les conditions initiales à t_r ont été identifiées sur chaque pincement étudié. La figure 6 présente la vitesse de la corde à t_r en fonction de son déplacement à ce même instant, pour chaque harpiste, indépendamment du doigt utilisé. Il apparaît que les harpistes imposent des conditions initiales aux cordes de manière très répétable. De plus, on observe pour chaque harpiste des caractéristiques communes, indépendantes de la corde jouée, montrant que chacun impose des conditions initiales spécifiques

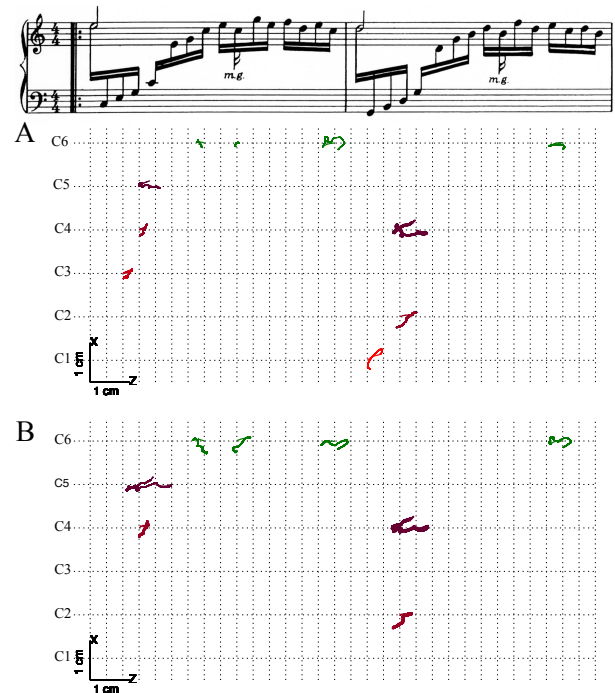


FIGURE 5 – Trajectoire de chacune des cordes au point de pincement en fonction des doigts du harpiste (main droite : Pouce - Index - Majeur - Annulaire ; main gauche : Pouce - Index - Majeur - Annulaire) lors du jeu de la variation 6, mesures 1 et 2, (A), puis reprises mesures 5 et 6 (B)

[4]. Par exemple le harpiste E apporte des déplacements plus élevés aux cordes que les autres harpistes. D'autre part, les conditions initiales données aux cordes par les harpistes dépendent de la corde : plus celle-ci est aiguë, plus l'instrumentiste imposera une vitesse initiale élevée et un faible déplacement. Cette tendance se retrouve également pour les cordes C_2 et C_3 même si leurs fréquences et tensions sont proches (voir le tableau 1). Ce résultat est probablement lié à l'effort de pincement qui est d'autant plus élevé que la corde est tendue et de faible longueur [13, 14].

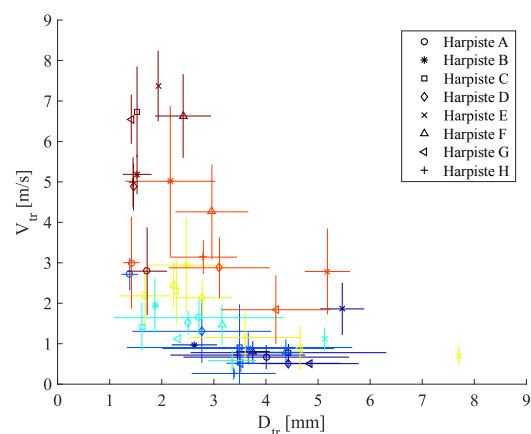


FIGURE 6 – Conditions initiales de vibrations des 6 cordes pour 8 harpistes lors du jeu de la variation 6. La couleur correspond à la corde jouée (code couleur identique à celui défini dans la figure 1) et les barres horizontales et verticales indiquent l'incertitude élargie à 95%.

Cette tendance peut maintenant être confrontée aux mouvements fonctionnels des membres supérieurs. Elle va

notamment dans le même sens pour le coude où l'angle de rotation à t_r est d'autant plus petit que les cordes sont aiguës. De même, l'épaule à t_r passe d'une position en rotation interne diminuant des cordes C_1 à C_4 à une position en rotation externe augmentant de C_5 à C_6 . Une hypothèse serait donc que les rotations du coude et de l'épaule participent également au geste producteur de son. Cette observation est cohérente avec nos précédentes analyses [6, 7].

4 Conclusion

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à l'ensemble de la chaîne à l'origine du son produit par un harpiste : de la posture générale au mouvement des doigts en contact avec la corde. Le protocole mis en place s'est attaché à mettre les musiciens dans une configuration de jeu la plus naturelle possible. Les résultats suggèrent trois rôles des mouvements des membres supérieurs : (a) compenser le déséquilibre postural induit par la présence de l'instrument, (b) participer à l'accompagnement de l'instrumentiste dans sa performance, et (c) prendre part à la production sonore. Ce dernier aspect s'est montré grandement influencé par la corde jouée, tout en gardant des spécificités pour chaque instrumentiste. En perspective, il sera intéressant d'étendre notre analyse aux mouvements des membres en dehors des périodes de pincement pour accéder aux notions d'interprétations et de transmission d'intention musicale. Il sera également intéressant d'appliquer des méthodes de dynamique inverse afin d'estimer les moments nets aux articulations lors de la mise en vibration de cordes de différentes natures.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Olivier Jacquet et Ilya Franciosi pour l'aide qu'ils ont apportée dans la mise en place du protocole expérimental et dans la réalisation des tests. Nous remercions très chaleureusement les harpistes qui ont bien voulu se prêter au jeu (par ordre alphabétique) : Pauline Amar, Aïste Baliunyte, Anne Boiché, Léo Doumène, Véronique Gantès Vogt, Hana Hrachovinová, Coline Jaget, Roxane Martin, Magali Monod-Cotte, Maëlle Rochut, Marie Saint-Bonnet et Raphaëlle Villa. Merci également à Isabelle Moretti pour son enthousiasme et son aide précieuse.

Références

- [1] J-L. Le Carrou, F. Gautier, J. Dugot, S. Le Conte et J. François, Vibratory study of harp's soundboxes, *Proceedings of 20th International Symposium on Music Acoustics (Associated Meeting of the International Congress on Acoustics)*, Sydney and Katoomba, Australia (2010).
- [2] D. Chadeaux, *Interaction Musicien/Instrument : le cas de la harpe de concert*, Thèse de Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie (2012).
- [3] R. Martin, *Tension/détente de la posture du harpiste en Europe occidentale*, Travaux de recherche de l'Institut Médecine des arts, Paris, France (2011).
- [4] D. Chadeaux, J-L. Le Carrou, B. Fabre et L. Daudet, Experimentally based description of harp plucking, *Journal of the Acoustical Society of America* **131(1)**, 844-855 (2012).
- [5] D. Chadeaux, J-L. Le Carrou et B. Fabre, A model of harp plucking, *Journal of the Acoustical Society of America* **133(4)**, 2444-2455 (2013).
- [6] D. Chadeaux, J-L. Le Carrou, B. Fabre, M. Wanderley et L. Daudet, Gestural strategies in the harp performance, *Acta Acustica united with Acustica* **99**, 986-996 (2013).
- [7] D. Chadeaux, J-L. le Carrou, B. Fabre et L. Daudet, *Investigation of the Harpist/Harp Interaction*, Sound, Music and Motion, Lecture Notes in Computer Science 8905, 3-19, Springer (2014).
- [8] J-L. Le Carrou, D. Chadeaux, L. Seydoux et B. Fabre, A low-cost high-precision measurement method of string motion, *Journal of Sound and Vibration* **333(17)**, 3881-3888 (2014).
- [9] O. Jacquet, *Mise en oeuvre d'une plate-forme expérimentale pour la caractérisation du contrôle gestuel du harpiste*, Mémoire de stage de Master 1 Phytém, ENS Cachan (2013).
- [10] M. Pámies-Vilà, *Caractérisation du pincement de la harpe de concert en contexte musical*, Mémoire de stage de Master 2 Sciences de l'Ingénieur, parcours ATIAM, Université Pierre et Marie Curie (2015).
- [11] J.P. Bello, L. Daudet, S. Abdallah, C. Duxbury, M. Davies et M.B. Sandler, A tutorial on onset detection in music signals, *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, **13(5)**, 1035-1047 (2005).
- [12] H. Penttinen et V. Välimäki, A time-domain approach to estimating the plucking point of guitar tones obtained with an under-saddle pickup, *Applied Acoustics*, **65(12)**, 1207-1220 (2004).
- [13] I.M. Firth, R. Brin et A. Gallacher, String design equations, *Journal of the catgut acoustical society*, **46**, 3-6 (1986).
- [14] I.M. Firth et C. Sykes, Harp strings of the eighteenth and twentieth centuries : an acoustical comparison, *The Galpin Society Journal*, **43**, 46-59 (1990).
- [15] A.I. Kapandji, *Anatomie fonctionnelle 1 : Membres supérieurs. Physiologie de l'appareil locomoteur*, Edition Maloine, 6eme édition (2005).