

# Étude expérimentale de l'interaction musicien/ instrument dans le cas de la harpe de concert

## Experimental study of the musician/instrument interaction in the case of the concert harp

**Delphine Chadefaux,  
Jean-Loïc Le Carrou, Benoît Fabre**  
Equipe LAM-d'Alembert, UMR CNRS  
7190  
11, rue de Lourmel  
75015 Paris  
E-mail : chadefaux@lam.jussieu.fr

**Marcello M. Wanderley**  
IDMIL/CIRMMT  
McGill University  
555, Sherbrooke Street West  
Montréal, QC,  
Canada H3A 1E3

**Laurent Daudet**  
Institut Langevin « Ondes et Images »,  
UMR CNRS 7587  
10 rue Vauquelin,  
75005 Paris

### Résumé

Au cours de son apprentissage, un musicien développe la capacité de produire la sonorité désirée. Ses gestes sont alors finement exécutés afin de contrôler chaque note. Dans le cas de la harpe de concert, une précédente étude a souligné la haute répétabilité et la spécificité du pincement d'une corde par un harpiste. Cependant, l'ensemble du corps de ce dernier est manifestement impliqué dans l'exécution d'un morceau, et son interaction avec l'instrument ne peut donc se réduire au seul pincement. Ainsi, par le biais d'une mise en évidence de la relation entre la gestuelle du harpiste et le contexte musical, le présent article propose une étude expérimentale de cette interaction. Pour cela, trois harpistes confirmés ont été invités à interpréter la *Danse Profane* de Claude Debussy. Leurs mouvements ont été captés à l'aide d'un système de caméras infrarouges et les signaux acoustiques produits ont été enregistrés simultanément. Un ensemble de descripteurs cinématiques et dynamiques a été extrait des données recueillies, permettant alors de caractériser les gestes instrumentaux (directement liés à la production sonore) et les gestes ancillaires (non directement impliqués dans la production sonore). Une corrélation entre le positionnement observé des harpistes et les recommandations de professeurs est effectuée, soulignant l'importance de la posture dans le jeu de la harpe. Les résultats indiquent également que les harpistes produisent des mouvements particulièrement répétables et spécifiques aux stratégies musicales mises en place.

### Abstract

Over the years, a trained musician develops the ability to produce a sound as desired: the player's gestures are precisely executed in order to control each note. In the case of the concert harp, a previous study had underlined the characteristics of string plucking, both highly reproducible and player-specific. However, the whole harpist's body is obviously also involved in a musical performance. Therefore, the present paper investigates the player / harp interaction, by characterizing the musical gestures in relation to the musical interpretation. We have captured the motion of three skilled harpists playing an excerpt of Debussy's *Danse Profane*, using a motion tracking system based on infrared cameras with acoustical measured synchronously. A set of kinematic and dynamic descriptors has been extracted from the collected data. They provide features of instrumental gestures (directly related to the sound production) and ancillary gestures (not directly involved in the sound production). Results indicate that the posture strategy is of great importance for harpists, and a correlation is made between the harpist gestural behavior and harp teachers recommendations. It is also shown that harpists perform remarkably reproducible gestures related to her/his musical strategy.

**E**n situation de jeu un musicien adopte une stratégie gestuelle lui permettant de satisfaire les objectifs de l'interprétation musicale. Notamment, il doit mettre l'instrument en vibration, éviter la fatigue et les douleurs musculaires, mais aussi interagir avec les éventuels autres musiciens présents (intention de communication) et le public (intention émotionnelle et musicale). Ces objectifs ont d'ores et déjà été l'objet d'études dans le cas des percussions [1,2], du piano [3] ou encore du violon [4] parmi d'autres instruments [5]. Cependant, jusqu'à présent, peu d'études ont porté sur les instruments à cordes pincées et, en particulier, sur la harpe de concert. Les harpistes confirmés affirment toutefois qu'il s'agit d'un instrument exigeant physiquement.

Mesurant environ 1,8 m, et pesant 35 kg, la harpe est jouée inclinée vers l'épaule droite du musicien et maintenue en équilibre à l'aide des genoux. Sa tessiture est comprise entre 31 Hz (Do $\flat$ -1) et 2 960 Hz (Sol $\flat$ 6), ce qui correspond à des tensions de cordes de 45 N à 756 N. Ces dernières valeurs représentent une limite au-delà de laquelle les instruments à cordes ne sont plus mis en vibration directement avec les doigts, mais avec un outil intermédiaire tel qu'un marteau dans le cas du piano. De plus, il a été montré que le pincement d'une corde dans le milieu de la tessiture de l'instrument (d'une tension de 260 N) nécessitait une force pouvant atteindre jusqu'à 15 N [6]. Ainsi, les stratégies posturales et gestuelles semblent être d'une grande importance dans le jeu de la harpe de concert.

Le présent article décrit les résultats préliminaires d'une étude sur les stratégies mises en œuvre par les harpistes lors de l'exécution d'un morceau. À cette fin, une analyse des caractéristiques posturales et gestuelles de l'interaction entre le harpiste et son instrument est proposée. La procédure expérimentale mise en place est tout d'abord présentée avant d'introduire le jeu de descripteurs cinématiques et dynamiques utilisé afin de décrire le jeu des harpistes. Enfin, les données obtenues sont analysées et mises en regard à la fois des recommandations de professeurs de harpe et du contexte musical dans lequel elles ont été recueillies.

## Procédure expérimentale

### Dispositif

Afin d'étudier l'interaction musicien/instrument, un dispositif expérimental spécifique a été mis en place. Il s'organise principalement autour de la capture du mouvement de marqueurs réfléchissants fixés sur les harpistes. Ce système de suivi est composé de six caméras infrarouges (système Vicon 460). Les signaux acoustiques ont également été enregistrés puis synchronisés avec les mouvements captés à l'aide de vidéos effectuées simultanément avec des caméras DV standards. Les marqueurs réfléchissants ont été disposés sur les musiciens selon le modèle Plug-in-Gait (VICON, Oxford Metrics Ltd, Oxford, Royaume-Uni). Il est à noter qu'aucun marqueur n'a été placé sur le buste des instrumentistes car la présence de la harpe en aurait obstrué la captation. De plus, le compromis nécessaire entre la fréquence d'échantillonnage de la capture de mouvement et l'étendue spatiale balayée a conduit à définir ce premier paramètre à 250 images par seconde. Ceci a permis la captation de l'ensemble des marqueurs excepté ceux positionnés sur la tête du harpiste. La figure 1-a propose une photographie prise lors d'une séance de mesures. À partir de la position des marqueurs réfléchissants, des modèles simplifiés du corps du harpiste et de la harpe peuvent être reconstruits comme l'illustre la figure 1-b, en noir pour le premier et en gris pour le second.

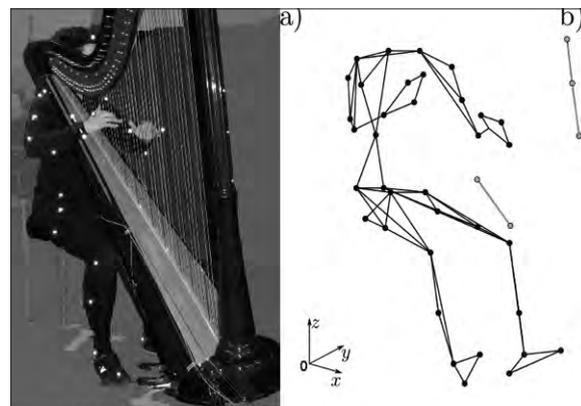


Fig. 1 : Photographie d'un harpiste prise lors d'une séance de mesures (a) associée aux squelettes reconstruits du musicien et de l'instrument  
Picture of a harpist during the measurement session (a) and extracted position of body segments (b)

### Protocole

Afin de mettre en évidence les caractéristiques gestuelles propres aux musiciens, trois harpistes ont été invités à participer à cette étude. Ils ont joué à trois reprises la Danse profane de Claude Debussy, dans son intégralité, sur une harpe de concert (Aoyama Orpheus 46 cordes). Parmi les musiciens, deux sont des musiciens d'orchestre (notés H1 et H3 dans la suite), tandis que le troisième (noté H2) est un musicien non professionnel pratiquant régulièrement son instrument. Les harpistes ont été laissés libres de s'adapter à la harpe ainsi qu'au contexte expérimental, et ce, aussi longtemps que nécessaire.

### Segmentation des données

Le début de la pièce est constitué d'une séquence de quatre intervalles d'octave répétés plusieurs fois, D, A, D, et B en notation anglophone, soient ré, la, ré et si en notation francophone. Seule la main gauche y est impliquée et aucun changement dans la configuration des pédales de l'instrument n'est nécessaire.

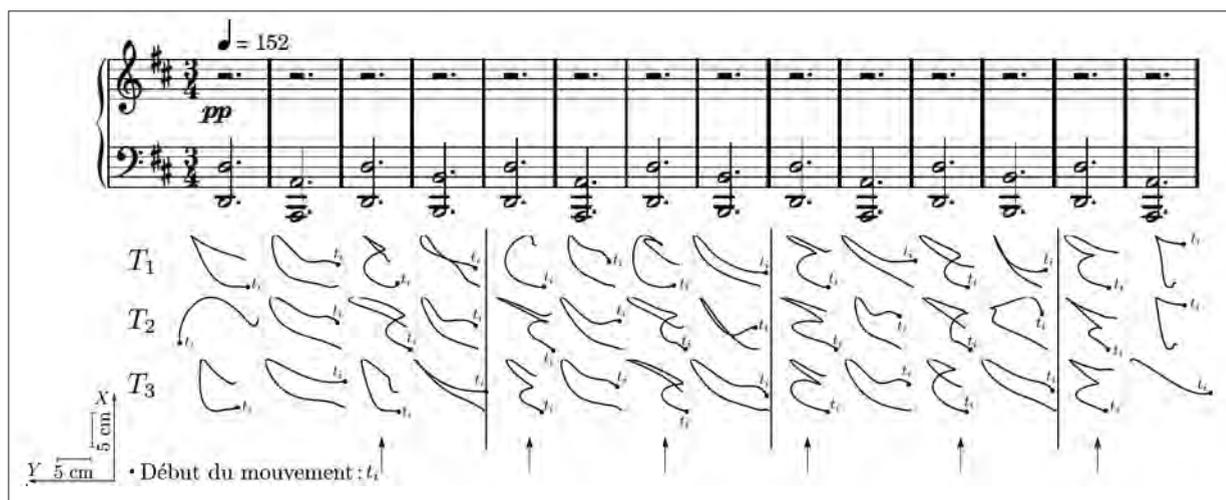


Fig. 2 : Répétabilité et caractéristiques des mouvements de la main gauche d'un harpiste jouant la « Danse Profane » de Debussy  
Repeatability and characteristics of left hand movement for a harpist performing the Debussy's « Danse Profane » excerpt

Ainsi, nous limitons la présente étude à cet extrait dont la partition est proposée à la figure 2.

Afin de caractériser la stratégie employée pour jouer une note, le geste et le son associés à celle-ci doivent être isolés. D'après [7], le geste producteur d'une note est défini comme l'action de pincement en elle-même combinée aux trajectoires de la main se dirigeant puis s'éloignant des cordes. En pratique, le début du geste est estimé lorsque la main entre en contact avec les cordes, juste avant que la note ne soit jouée. Ainsi, chaque attaque acoustique, i.e. chaque instant où les cordes sont lâchées par le harpiste, doit être mis en évidence. Pour ce faire, des méthodes classiques de détection d'attaque sont appliquées aux signaux acoustiques enregistrés [8,9].

### Analyse cinématique

#### Référentiels global et anatomique

Les données brutes de capture de mouvement recueillies consistent en les coordonnées des marqueurs au cours du temps. Elles sont fournies dans le référentiel global (X, Y, Z) défini à la figure 3. Ce référentiel est fixe dans le laboratoire et son origine est choisie sous le siège harpiste. X est la direction avant/arrière, Y est la direction médiale/latérale et Z est la verticale, définie par la pesanteur. La plupart des analyses ont été effectuées dans le référentiel global. Cependant dans le but d'effectuer des analyses cinématiques des articulations du harpiste, les référentiels anatomiques liés à chaque segment du bras sont nécessaires. Ils sont notés  $(x_u, y_u, z_u)$ ,  $(x_f, y_f, z_f)$ , et  $(x_h, y_h, z_h)$  à la figure 3 respectivement pour le bras, l'avant-bras et la main. Pour chaque référentiel anatomique, l'axe z est pris le long du segment et son origine correspond à son centre de masse. Celui-ci est accessible à l'aide de la masse du harpiste combinée aux données anthropométriques moyennes relatives à chaque segment [10].

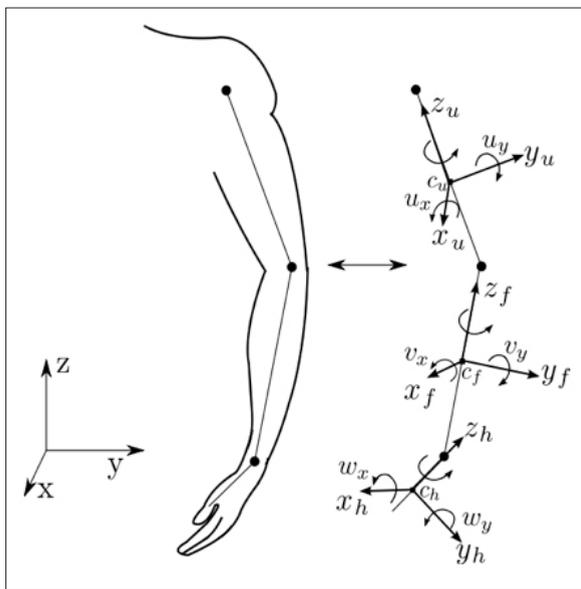


Fig. 3 : Référentiels global et anatomique indiqués par les segments constituant le bras gauche  
Anatomical arm segments showing the global and anatomical reference systems

### Descripteurs du jeu à la harpe

#### Positionnement harpiste/harpe

Dans le but de décrire la posture des harpistes en situation de jeu, un ensemble de descripteurs est défini sur la base de données cinématiques liées au musicien ainsi qu'à son instrument. Des marqueurs spécifiques placés sur les articulations acromio-claviculaires, les épaules iliaques antérieures et supérieures, ainsi que sur les épicondyles des genoux permettent de calculer :

- l'inclinaison de la harpe,
- la courbure du dos par rapport au sol,
- l'ouverture des hanches,
- la rotation des épaules par rapport aux hanches,
- et la rotation des hanches par rapport à la harpe.

Ces angles sont définis par les lignes rouges du schéma proposé figure 4.

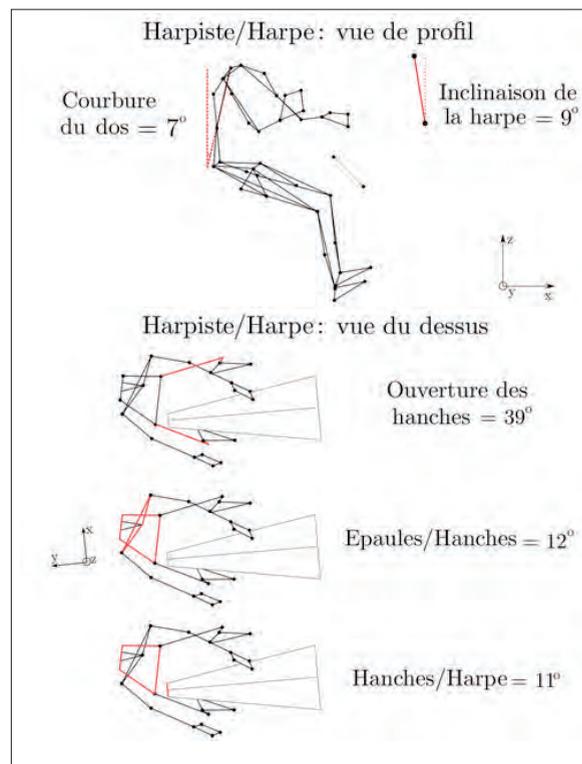


Fig. 4 : Positionnement moyen du harpiste H1 par rapport à la harpe, calculé sur les trois répétitions de l'extrait  
Harpist posture related to the concert harp. The mean position is computed on the three repetitions of the musical excerpt by the harpist H1

#### Posture du bras

Les mouvements de rotation effectués aux articulations du bras sont évalués pour caractériser les stratégies posturales du harpiste en situation de jeu. Un modèle cinématique du bras est utilisé pour transformer les coordonnées cartésiennes définissant la position de chaque segment dans le référentiel global en rotations autour des axes des référentiels anatomiques. L'épaule est modélisée comme une énarthrose à trois degrés de liberté en rotation alors que le coude et le poignet sont quant à eux modélisés comme des énarthroses à deux degrés de liberté en rotation [12,13].

En utilisant les axes anatomiques définis à la figure 3, ces mouvements sont répertoriés ci-dessous pour chacune des articulations :

- épaule : abduction/adduction (autour de  $ux$ ), antever-sion/retroversion (autour de  $uy$ ) et rotation (autour de  $uz$ ) du bras,
- coude : flexion/extension (autour de  $vy$ ), et pronation/supination (autour de  $vz$ ) de l'avant-bras,
- poignet : déviations radiale/cubitale (autour de  $wx$ ), flexion palmaire/ extension dorsale (autour de  $wy$ ) de la main.

Remarquons que la position de référence du bras gauche est au repos, étendue le long du corps, la paume de la main orientée vers l'intérieur.

### Mouvements du bras et de la main

Afin de présenter la cinématique du bras des harpistes, une description complète en trois dimensions (position, vitesse et accélération) est fournie par le diagramme de la figure 5. Chacun des segments, i.e. la main, l'avant-bras et le bras, est représenté par une ligne droite à chaque instant de la production d'une note. Pour une meilleure lisibilité de la figure, les données ont été sous-échantillonnées d'un facteur 5. De plus, pour analyser la répétabilité et les caractéristiques des gestes producteurs de son ainsi que des gestes ancillaires [14], les mouvements de la main sont étudiés dans le plan ( $xOy$ ).

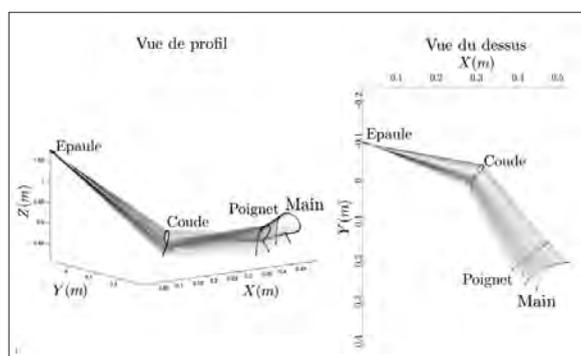


Fig. 5: Exemple de geste effectué par le bras gauche pour jouer un intervalle d'octave  
Example of left arm gesture corresponding to the performance of one octave interval

### Analyse dynamique

Le paragraphe précédent traite exclusivement de la caractérisation des mouvements des harpistes et de l'analyse de leur posture, sans égard aux forces en jeu. Toutefois, pour identifier les causes et les stratégies sous-jacentes au geste des harpistes, leurs comportements doivent être connus. En utilisant la méthode de la dynamique inverse [15], les efforts et les moments existant à chaque articulation du bras peuvent être calculés. À partir de ces paramètres physiques, la puissance générée et donc le travail produit sont accessibles. En combinant cette méthode à une hypothèse sur la force appliquée par le doigt sur la corde lors du pincement, l'efficacité des gestes est évaluée. Cette force est estimée à l'aide d'une modélisation classique de la corde [16] et des ordres de grandeurs connus des paramètres impliqués [6].

Octave	D	A	B
Abduction de l'épaule ( $ux$ )	23.7° (0.1°)	21.8° (0.2°)	23.6° (0.1°)
Antéversion de l'épaule ( $uy$ )	47.5° (0.1°)	49.6° (0.2°)	47.7° (0.2°)
Rotation de l'épaule ( $uz$ )	22.2° (0.1°)	19.3° (0.2°)	20.0° (0.2°)
Flexion du coude ( $vy$ )	122.6° (0.1°)	119.6° (0.3°)	122.6° (0.2°)
Supination du coude ( $-vz$ )	17.3° (0.1°)	18.1° (0.2°)	17.4° (0.3°)
Déviations cubitales de la main ( $-wx$ )	45.0° (0.2°)	39.8° (0.4°)	44.9° (0.3°)
Extension dorsale de la main ( $-wy$ )	25.8° (0.1°)	27.5° (0.2°)	26.0° (0.3°)

Tabl. 1 : Positionnement des articulations du bras gauche du harpiste (deg) en situation de jeu dans les référentiels anatomiques définis figure 3. Les valeurs moyennes sont calculées pour chaque note jouée au cours des trois répétitions de l'extrait. L'incertitude, proposée entre parenthèses, est calculée avec un intervalle de confiance de 95%.  
Left arm joints rotation (deg) computed during harp performance according to systems of reference defined in figure 3. The mean is computed on each note separately over the three repetitions of the musical excerpt. The reported uncertainty represents a 95% confidence interval.

### Discussion

Dans ce qui suit, les descripteurs précédemment introduits sont calculés pour un harpiste (H1) lors de ses trois exécutions de l'extrait musical présenté à la figure 2.

### Posture du harpiste en situation de jeu

#### Harpiste/harpe

La figure 4 indique les caractéristiques mesurées de la posture du harpiste H1 au cours des trois répétitions de l'extrait musical. Elles sont calculées d'après la section III.2.1. Tout d'abord, les faibles incertitudes (évaluées à moins de 0,5% de la position moyenne) valident le protocole expérimental mis en place. Elles tendent également à indiquer que le harpiste ainsi que la harpe sont particulièrement stables, quelle que soit la note jouée. D'autre part, comme déjà mentionné, la harpe est jouée inclinée vers l'épaule droite incitant le musicien à laisser une ouverture mesurée à 39° entre ses jambes. Il apparaît également que le harpiste se tient quasiment droit (son dos est courbé d'environ 7° vers l'avant), tout en s'orientant vers le plan des cordes. En effet, un angle non négligeable existe (environ 12°) entre les hanches et les épaules du harpiste, l'épaule gauche étant positionnée en avant.

Les résultats expérimentaux correspondent aux recommandations des professeurs de harpe quant à la posture à adopter. En effet, selon les discussions informelles eues avec certains d'entre eux, l'inclinaison de la harpe est le paramètre le plus important afin de trouver la posture adéquate.

Pour des raisons de commodité, la harpe doit être inclinée jusqu'à être en équilibre, minimisant ainsi le poids ressenti tout en le partageant entre l'épaule droite et les genoux. En outre, la colonne vertébrale doit être maintenue droite avec une légère torsion vers la gauche afin d'atteindre les cordes les plus éloignées, tout en évitant les blessures au dos. Finalement, la harpe est placée transversalement à l'interprète, afin de garder le dos droit.

#### Positionnement des articulations du bras

Le tableau 1 présente les rotations mesurées de chaque articulation du bras dans les référentiels associés (définis dans la figure 2). Il n'apparaît pas de différence fondamentale entre les trois intervalles d'octave joués D, A et B. De même que précédemment, les incertitudes sont faibles (inférieures à 1°), soulignant la stabilité de la posture du harpiste au cours des trois exécutions de l'extrait. Le positionnement du bras étant fortement tributaire de la morphologie du harpiste ainsi que de la position des cordes par rapport à celui-ci, les faibles incertitudes sont probablement dues au faible ambitus de l'extrait proposé. Concernant la position du bras, les professeurs de harpe expliquent que le coude doit être levé à 45° en avant du buste. Le mouvement d'antéversion de l'épaule impliquant l'élévation du coude a été mesuré à environ 48°, appuyant une nouvelle fois les conseils des professeurs de harpe. L'extension dorsale de la main, à savoir l'angle entre l'avant-bras et la main, est évaluée pour sa part à 27°. Les harpistes recommandent en effet de garder un léger angle entre la main et l'avant-bras afin de faciliter la projection des doigts dans la paume après le pincement. Dans cette situation, seul le muscle fléchisseur profond des doigts (muscle de l'avant-bras permettant la flexion des doigts) est impliqué, facilitant alors la réouverture du poing et ainsi la détente des doigts.

#### Mouvement du bras en situation de jeu

Après avoir étudié la posture globale adoptée par les harpistes, la cinématique du bras en cours de jeu est analysée ici. La figure 5 présente un diagramme du bras gauche entre deux notes successives. Cet exemple a été choisi en raison de sa pertinence par rapport à l'ensemble du panel enregistré. Cette représentation exprime la façon dont le mouvement global du bras est partagé entre les articulations. L'épaule semble être quasiment immobile alors que le coude et, dans une plus grande mesure, le poignet ont des mouvements d'amplitudes plus importantes. Comme attendu du fait de la masse relative des différents membres du bras, l'épaule est le point d'ancrage du bras, contrôlant son mouvement.

La main ayant les mouvements les plus amples, l'analyse de ceux-ci est effectuée afin d'étudier les gestes producteurs de son ainsi que les gestes ancillaires, i.e. les mouvements de la main pendant et après le pincement. La figure 4 présente le mouvement de la main gauche dans le plan (xOy) pour toutes les notes effectuées au cours des trois exécutions notés T1, T2 et T3. L'analyse de ces mouvements montre des motifs répétables pour une note donnée, et ce, au cours des trois exécutions de l'extrait musical. Après avoir joué les notes A et B, la main a un mouvement régulier, en forme de cloche, afin de retourner en arrière jouer la note D. Au contraire, une fois celle-ci jouée, la main se déplace de nouveau vers l'avant avec des mouvements plus complexes.

La technique impliquée pour jouer les notes A, B ou C ne différant guère, les divers motifs gestuels observés peuvent être expliqués par la stratégie du harpiste en regard de la structuration de la phrase musicale. En effet, une interprétation de l'extrait comme une répétition de la séquence D-A-D-B justifie l'appui plus important apporté à ses premiers et troisième temps, et donc les mouvements plus complexes de la main pour jouer les notes D, mises en évidence par des flèches sur la figure 4, que les notes A et B. Notez que la première note de l'extrait n'est pas considérée du fait de sa position plus complexe impliquant des phénomènes d'anticipation.

Octave	D	A	B
<b>Efficacité du geste</b>	0.092% (0.005%)	0.021% (0.003%)	0.028% (0.002%)

**Tabl. 2 : Efficacité moyenne des gestes de la main effectués pour jouer chaque octave de l'extrait. La moyenne est calculée sur les trois répétitions de l'extrait. L'incertitude, proposée entre parenthèses, est calculée avec un intervalle de confiance de 95%**  
*Left hand gesture efficiency computed during harp performance. The mean is computed on each note separately over the three repetitions of the musical except. The reported uncertainty represents a 95% confidence interval*

#### Efficacité des gestes

La quantité d'énergie générée au sein du bras du harpiste par rapport à celle transférée à la corde est estimée dans ce paragraphe d'après la méthode proposée à la section III.3. Les résultats, présentés dans le tableau 2, indiquent que l'efficacité du geste du bras est très faible (moins de 0,01%). Cela signifie que les gestes décrits au cours des précédents paragraphes sont très coûteux en énergie par rapport à l'action de pincement des cordes. Ceci met en exergue l'importance des gestes ancillaires dans la stratégie du harpiste. De plus, l'efficacité estimée pour la note D est environ 4.5 fois plus élevée que pour les notes A et B. Cette observation peut de nouveau être liée à l'interprétation harpiste de la phrase musicale.

#### Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté une étude préliminaire de l'interaction musicien/instrument dans le cas de la harpe de concert. Nous avons étudié la posture générale du harpiste en regard de son instrument ainsi que le comportement du bras lors de la mise en vibration des cordes. A cet effet, des analyses cinématiques et dynamiques ont été effectuées en conditions de jeu réalistes. Les résultats indiquent que la posture globale des harpistes est très stable en cours de jeu. Les mesures effectuées du positionnement relatif du harpiste par rapport à son instrument sont corrélées avec les recommandations des professeurs de harpe. De plus, les relations géométriques existant entre chaque membre du bras du harpiste restent constantes au cours du jeu. Par ailleurs, alors que l'épaule est un point central de la gestion du geste, la main produit les gestes les plus amples. Considérant un seul harpiste, des motifs gestuels répétables ont été mis en évidence au cours des trois exécutions de l'extrait.

Enfin, à une note donnée en un point précis de la phrase musicale, les gestes de la main ainsi que l'efficacité du bras sont également particulièrement répétables. Cela suggère que l'interprétation musicale du harpiste est, entre autres, véhiculée par les mouvements des mains.

En perspectives, des travaux complémentaires seront menés afin de mettre en évidence les stratégies gestuelles mises en place dépendamment du harpiste et de ses compétences musicales. Notamment, des analyses audio et vidéo poussées permettront d'identifier les relations existantes entre la gestuelle et l'intention musicale du musicien. Enfin, l'étude du compromis nécessaire entre les divers objectifs musicaux auxquels le harpiste doit satisfaire sera effectuée par le biais d'une analyse du contrôle gestuel, en combinant par exemple l'étude des mouvements globaux du musicien avec celle de la technique de pincement.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Caroline Brum Medeiros et Mahtab Ghamsari-Esfahani pour leur aide lors des mesures, ainsi que Jennifer Swartz pour son intérêt dans cette étude, et les harpistes qui ont participé à cette étude: Marie Denizot, Eveline Grégoire-Rousseau, Caroline Lieby-Muller, Antoine Malette-Chénier, Magali Monod-Cotte et Mary Elizabeth Sutherland.

## Références bibliographiques

- [1] S. Dahl, A. Friberg, Expressiveness of musician's body movements in performances on marimba, In *Gesture Workshop'03*, pages 479-486, 2003.
- [2] S. Dahl, Playing the accent – comparing striking velocity and timing in an ostinato rhythm performed by four drummers. *Acta Acustica United With Acustica*, Vol. 90(4), pages 762-776, 2004.
- [3] D.A. Winter, *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*, 4eme édition, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New jersey, 2009.
- [4] I. Poggi, Body and Mind in the pianist's performance, in *Proceedings of the 9th International Conference on Music Perception and Cognition (ICMPC9)*, pages 1044-1051, Bologne, Italie, 2006.
- [5] N.H. Rasamimanana, E. Fléty, F. Bévillacqua, Gesture analysis of violin bow strokes, in *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 3881, pages 145-155, Springer-Verlag, 2006.
- [6] F.J. Bejjani, N. Halpern, Postural kinematics of trumpet playing, *Journal of Biomechanics*, Vol. 22(5), pages 439-446, 1989.
- [7] D. Chadefaux, J.L. Le Carrou, B. Fabre, L. Daudet, Experimentally based description of harp plucking, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 131(1), pages 844-855, 2012.
- [8] A.R. Jensenius, M.M. Wanderley, R.I. Godøy, M. Leman, *Musical Gestures : Sound, Movement, and Meaning*, chapter *Musical Gestures : concepts and methods in research*, pages 12-35, Routledge, New-York, 2009.
- [9] J.P. Bello, L. Daudet, S. Abdallah, C. Duxbury, M. Davies, M. Sandler, A tutorial on onset detection in music signal. *IEEE transactions on Speech and Audio Processing*, Vol. 13, pages 1035-1047, 2005.
- [10] C. Duxbury, J.P. Bello, M. Davies, M. Sandler, Complex domain onset detection for musical signals, *6th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx)*, Vol. 1, pages 90-94, 2003.
- [11] O. Ortmann, *The Physiological Mechanics of Piano Technique*, E.P. Dutton, New-York, 1929, reprinted 1962.
- [12] R. Raikova, A general approach for modelling and mathematical investigation of the human upper limb. *Journal of Biomechanics*, Vol. 25(8), pages 857-867, 1992.
- [13] R. Riener, A. Straube, Inverse dynamics as a tool for motion analysis : arm tracking movements in cerebellar patients, *Journal of Neuroscience Methods*, Vol. 72(1), pages 87-96, 1997.
- [14] M.M. Wanderley, B. Vines, N. Middleton, C. McKay, W. Hatch, The Musical significance of clarinetist's ancillary gestures : An exploration of the field. *Journal of New Music Research*, Vol. 34(1), pages 97-113, 2005.
- [15] B. Bresler, J. Franker, Forces and moments in the leg during level walking, *Trans. ASME*, Vol. 72, pages 27-36, 1950.
- [16] A. Chaigne, J. Kergomard, *Acoustique des instruments de musique*, Belin, 2008, ISBN 978-2-7011-3970-8.