

**CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018**  
**14<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique**



**Acoustique des harpes d'Afrique centrale : étude préliminaire**

J.-L. Le Carrou<sup>a</sup>, D. Bedoya<sup>a</sup>, M.-F. Mifune<sup>b</sup> et S. Le Bomin<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Sorbonne Université, CNRS, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Equipe LAM, F-75005 Paris, France

<sup>b</sup>Eco-anthropologie et ethnobiologie, UMR 7206, CNRS, Muséum national d'Histoire naturelle,  
Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, Sorbonne Universités, 75116 Paris, France

jean-loic.le\_carrou@upmc.fr

S'inscrivant dans le cadre d'une recherche pluridisciplinaire consacrée à l'histoire évolutive des harpes d'Afrique centrale, cette étude porte sur la comparaison des propriétés acoustiques de trois harpes collectées au Gabon dans les ethnies Fang, Tsogho et Massango. La grande diversité et variabilité de l'instrument observée au niveau morphologique, esthétique, musical et symbolique aussi bien entre les populations qu'au sein de chaque population nous amène à étudier les processus évolutifs de l'instrument au niveau de ses paramètres constitutifs. Il s'agit, notamment, de déterminer et de définir des descripteurs acoustiques en complément des descripteurs organologiques et ethnomusicologiques. Le comportement vibratoire des trois harpes a été analysé. Les méthodes classiquement utilisées pour les instruments occidentaux (mesure de mobilité, analyse modale) ont été mises en place, mais se sont avérées suffisamment discriminantes malgré le comportement non linéaire de la peau d'animal constituant la table d'harmonie. Les résultats montrent que la manière dont cette peau est préparée constitue un élément essentiel dans le comportement vibratoire de l'instrument. L'élaboration d'une méthodologie d'analyse systématique va permettre d'effectuer des mesures sur le terrain et dans les collections muséales afin d'enrichir le corpus d'étude comparative des harpes.

## 1 Introduction

Au Gabon, la musique est un élément essentiel dans les activités sociales des populations et notamment les cérémonies rituelles liées aux confréries initiatiques ou aux pratiques thérapeutiques [1–3]. De tradition orale, les savoirs et savoir-faire qui sont liés aux pratiques vocales et instrumentales sont transmis de génération en génération de façon plus ou moins implicite, par observation et imitation. Un des objectifs novateur de l'étude de ces pratiques musicales est de contribuer à la mise au jour de leur histoire évolutive, et corollairement, de proposer des hypothèses sur l'histoire des populations qui les pratiquent. Dans cette perspective, nous avons concentré notre étude sur les harpes d'Afrique centrale. Présentes en grand nombre dans les collections muséales et dans la majorité des populations dans l'aire géo-culturelle concernée, les harpes d'Afrique centrale permettent d'envisager une vaste étude comparative prenant en compte différents domaines scientifiques liés à la facture et aux contextes socio-culturels. Ainsi, la recherche de descripteurs acoustiques en complément des descripteurs organologiques, musicologiques et ethnomusicologiques s'avère particulièrement pertinente.

Pour cette première étude, nous avons focalisé notre analyse sur les harpes du Gabon. Pratiquées en contexte rituel, leur diffusion au sein des populations qui en jouent à l'heure actuelle (Tsogho, Massango, Apindji, Myéné, Fang, Pygmées bongo) s'est faite conjointement avec la diffusion de la pratique rituelle du culte *bwiti*. On observe une grande diversité et une grande variabilité au niveau de la morphologie, de la musique, de la technique de jeu et de l'esthétique de l'instrument tant entre les populations qui en jouent qu'au sein d'une même population.

Après une description des instruments à notre disposition issus de trois ethnies différentes (Fang, Tsogho et Massango), nous détaillerons la méthodologie mise en oeuvre pour décrire le comportement vibratoire de ces instruments. Enfin, une analyse des résultats nous permettra de proposer des descripteurs vibratoires discriminants les instruments, pouvant, à terme, être utilisés pour étudier leurs processus évolutifs.

## 2 Description des harpes

Les harpes analysées, voir Figure 1, sont des instruments qui proviennent du Gabon. Elles ont été collectées par l'ethnomusicologue Marie-France Mifune en 2016 auprès

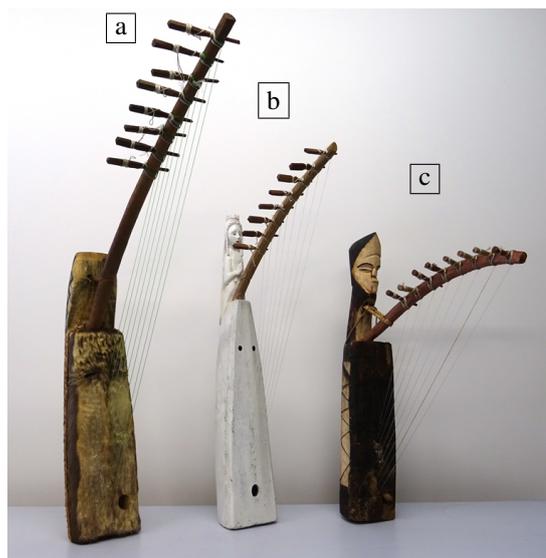


FIGURE 1 – Les trois harpes de l'étude : **a** harpe Tsogho, **b** harpe Fang, **c** harpe Massango.

de fabricants de harpe dans trois populations différentes (Tsogho, Fang et Massango). Mifune a également suivi le processus de fabrication auprès des fabricants de harpe Tsogho et Fang. De forme triangulaire, les harpes sont munies de 8 cordes en nylon (autrefois en matériau végétal) attachées, d'une part, aux chevilles fixées au manche, et de l'autre, à un cordier en bois. Celui-ci est fixé sous la table d'harmonie qui, elle, est confectionnée à partir d'une peau d'animal (antilope ou céphalophe) et clouée sur la caisse de résonance [4]. Monoxyle et de forme parallélépipédique, la caisse est fabriquée d'un seul tenant en creusant un morceau de bois. Les spécificités de chacune des 3 harpes sont les suivantes :

- la harpe Tsogho a le manche le plus long des trois harpes. Sur cet exemplaire, on peut remarquer la présence de poils sur une grande partie de la peau constituant la table d'harmonie. Sur la caisse, l'instrument présente des décorations géométriques réalisées par pyrogravure. Du raphia tressé couvre le pourtour de la caisse et cache les clous qui fixent la peau. Le sommet de la caisse présente une sculpture en forme de spatule.
- la harpe Fang a la table d'harmonie la plus grande des trois instruments. Le sommet de la caisse présente une sculpture anthropomorphe féminine portant un voile

et une couronne avec les mains en position de prière. Cette sculpture représente la Vierge Marie. L'ensemble de la caisse et la table d'harmonie est peinte en blanc.

- La harpe Massango est la plus petite des trois harpes. Le sommet de la caisse présente une sculpture anthropomorphe. Les dessins géométriques inscrits sur la caisse de résonance et la décoration de la tête ont été réalisés par pyrogravure. La table d'harmonie est constituée d'une peau d'animal peinte.

Les cordes sont numérotées de 1 à 8, 1 étant la corde la plus aiguë et 8 la plus grave. Les travaux menés sur les échelles musicales de façon intensive en République centrafricaine et de façon plus sporadique au Cameroun et au Gabon ont montré que dans la majorité des cas les hauteurs absolues ne sont pas pertinentes [5–9]. Ainsi, deux harpes dans une même population, voire pour un même musicien peuvent être accordées sur des hauteurs de note différentes. Il en est de même pour les intervalles entre les notes dans une certaine mesure qui s'inscrivent dans une marge de réalisation plus ou moins importante. En revanche, la réalisation de plusieurs versions d'une même pièce est conditionnée par le respect de l'ordre de succession des degrés. Ainsi, malgré un accordage différent, chaque harpe possède une échelle hexatonique hémitonique quasi-identique (avec les cordes 7 et 8 accordées à l'octave des cordes 1 et 2). La seule différence se situe au niveau de l'emplacement du demi-ton entre les cordes 6 et 7 (Tsogho et Massango) et 5 et 6 (Fang).

### 3 Méthodologie

Dans le but d'étudier le comportement vibratoire des trois harpes précédemment décrites, nous avons mis en place un protocole expérimental classique en analyse vibratoire qui pourra, à terme, être utilisé par les chercheurs en ethnomusicologie sur le terrain.

#### 3.1 Protocole expérimental

Pour étudier le comportement dynamique des harpes, un ensemble de Fonctions de Réponse en Fréquence (FRF) a été mesuré. Une FRF est définie comme le ratio, dans le domaine fréquentiel, de la réponse de la structure sur la force exercée sur celle-ci. C'est une grandeur qui dépend, évidemment, de l'instrument, mais aussi de l'endroit où la réponse et l'excitation ont été mesurées. Lorsqu'elles se trouvent au même point, on dit dans ce cas qu'elles sont co-localisées.

Ici, les FRFs sont calculées à partir des mesures d'un accéléromètre (PCB 352A21) collé sur l'instrument avec de la cire et du capteur de force d'un marteau d'impact de faible taille (PCB 086E80) qui est utilisé pour mettre en vibration la table d'harmonie. Une analyse de cohérence de nos mesures a permis de montrer qu'il était préférable d'utiliser une potence pour maintenir le marteau afin d'avoir des mesures de qualité sur une plage de fréquence étendue. Pour s'affranchir de la vibration des cordes, ces dernières ont été étouffées avec du feutre. De plus, les harpes sont, de plus, suspendues par un tendeur de telle sorte qu'elles soient proches des conditions aux limites libre-libre. Lors des mesures, les instruments ont été accordés au plus près de

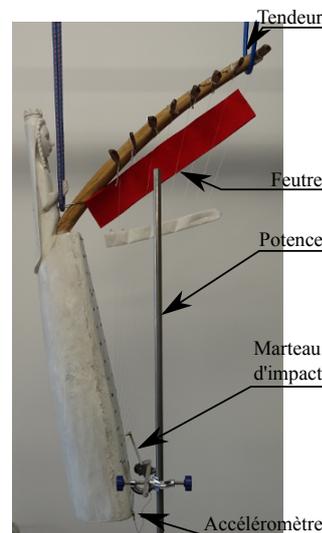


FIGURE 2 – Dispositif expérimental.

leur accordage d'origine, en se basant sur les enregistrements de l'accord des harpes auprès des harpistes sur le terrain. La Figure 2 présente une image du dispositif expérimental.

#### 3.2 Descripteurs vibratoires

##### 3.2.1 Analyse modale expérimentale

L'identification des modes est obtenue par analyse modale expérimentale : fréquence propre, déformée modale et amortissement sont extraits des FRFs mesurées à différents points de la structure. Pour chaque instrument, un maillage expérimental est défini (voir figure 3) suivant le compromis classique entre le nombre de points de mesures et la meilleure résolution spatiale possible (suivant le domaine de fréquence d'étude). Sur chaque maillage, le point fixe (position de frappe du marteau) est indiqué sur la figure 3.

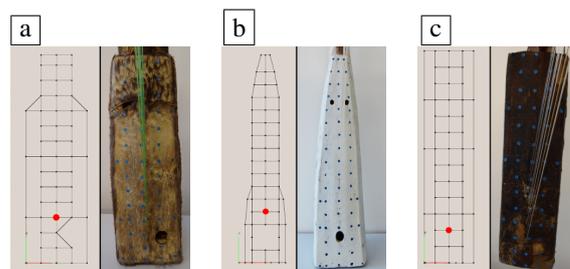


FIGURE 3 – Maillage des trois harpes de l'étude : **a** harpe Tsogho, **b** harpe Fang, **c** harpe Massango. Le point rouge indique le point fixe de frappe du marteau.

La méthode d'identification utilisée pour obtenir les modes propres est basée sur la méthode LSCF (Least Square Complex Frequency) [10] implémentée dans le logiciel Modan (développé au sein du laboratoire Femto-St de Besançon). La procédure d'identification consiste, tout d'abord, en une phase d'initialisation par le calcul d'un indicateur, le CMIF (Fonction d'Indicateur de Mode Complexe), permettant de visualiser le nombre de modes présents dans la bande fréquentielle analysée. Puis, une identification globale est entreprise par la méthode des moindres carrés complexes dans le domaine fréquentiel (LSCF). Après un calcul itératif où le nombre de modes du

modèle est croissant, on vient sélectionner les pôles stables de la décomposition fractionnelle dans un diagramme de stabilisation. Enfin, une partie importante de cette analyse est dédiée à la validation des résultats par la comparaison des FRFs mesurées en chaque point, aux FRFs synthétisées à partir des paramètres obtenus par l'identification modale. Les paramètres modaux ainsi que l'ordre du modèle (nombre de modes) sont maintenant connus.

### 3.2.2 Carte de Conductances

L'objectif de l'analyse modale expérimentale est d'identifier la base de vibration sur laquelle la réponse libre de l'instrument peut se décomposer. De manière complémentaire, on peut souhaiter avoir une information rapide sur le couplage entre la corde et la table d'harmonie qui a la particularité, sur la harpe notamment, d'être réparti le long de la table d'harmonie. Cette information de couplage est obtenue par l'analyse des FRFs co-localisées au pied de chaque corde. Mise sous forme de mobilité ou d'admittance (rapport de la vitesse sur l'effort) et dont on extrait la partie réelle (conductance), cette quantité permet d'expliquer, à une fréquence donnée, l'atténuation rapide de la vibration d'une corde (appelée *dead-spot* dans le cas de la guitare électrique) [11] ou encore un fort rayonnement de la table d'harmonie [15]. En mesurant cette mobilité au pied des 8 cordes, il est possible d'obtenir une carte de conductances qui rend compte, assez rapidement, des potentiels effets corde à corde et donc d'une in-homogénéité sonore de l'instrument. Ces cartes de mobilité ont été employées avec succès pour comparer le comportement vibratoire de 4 harpes modernes [13] ou analyser l'acoustique d'une petite harpe d'Écosse [14].

### 3.2.3 Valeur moyenne d'admittance, MVM

L'analyse des mobilités permet, en basse fréquence, d'identifier le comportement modal de l'instrument. Par contre, lorsque le recouvrement modal est important, on peut extraire un indicateur traduisant la réponse globale de l'instrument à une excitation. C'est l'objectif du MVM (*Mean Value of Mobility*) qui est simplement le résultat de la moyenne de la mobilité sur une plage de fréquence. Cet indicateur a été utilisé pour analyser différentes stratégies de fabrication de harpes modernes [15] et de harpes anciennes [16]. À noter que cet indicateur n'est pas sans rapport avec l'admittance caractéristique, définie comme la mobilité équivalente de la structure avec des dimensions infinies [17] et utilisée avec succès pour, notamment, discriminer des guitares de luthier et de guitares industrielles [18].

## 4 Résultats

Dans le Tableau 1, sont regroupés les premiers modes identifiés pour chaque harpe : 3 à 4 modes de flexion (F) et 1 mode de roulis (R). Au delà du troisième mode de flexion, voire deuxième mode pour la harpe Tsogho, le recouvrement modal n'a pas permis d'effectuer une identification satisfaisante. Contrairement à ce qui était attendu, les rapports des fréquences montrent que la table d'harmonie des harpes Tsogho et Massango a un comportement vibratoire proche d'une plaque mince

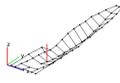
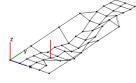
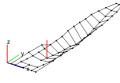
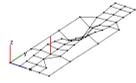
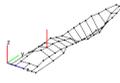
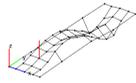
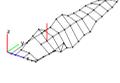
Mode	Harpe Tsogho	Harpe Fang	Harpe Massango
1F	 401,7 Hz - 1,6%	 166,5 Hz - 5,7%	 299,6 Hz - 2,6%
1FBis	 415,1 Hz - 2,8%	 231,9 Hz - 1,2%	
2F	 467,3 Hz - 1,7%	 361,4 Hz - 2,6%	 389,2 Hz - 1,7%
2FBis	 537,4 Hz - 1,9%		
3F		 378,5 Hz - 1,7%	 505,2 Hz - 2,2%
1R		 474,7 Hz - 0,9%	

TABLEAU 1 – Résultats de l'analyse modale expérimentale menée sur les 3 harpes : déformées modales, fréquences modales et amortissements.

simplement supportée alors que la table d'harmonie de la harpe Fang semble plus proche d'une membrane fixée sur ses bords. Malgré des dimensions de table d'harmonie proches, les harpes Massango et Tsogho présentent des fréquences modales bien différentes. Ceci est probablement dû aux différences de masse surfacique et/ou de rigidité de la table d'harmonie, directement liées à la préparation de la peau et aux réglages du facteur d'instrument. Par son geste, il va ajuster ces modes et donc la réponse de l'instrument à l'excitation des cordes.

La carte de conductance de chacune des harpes est montrée dans la figure 4. L'axe horizontal indique la fréquence, l'axe vertical le numéro de la corde au pied de laquelle la FRF a été mesurée et l'échelle de couleur sa valeur. Les points rouges montrent la fréquence fondamentale de la corde et les points blancs la fréquence des partiels. Par ces cartes, on voit, tout d'abord, les déformées opérationnelles de vibration des tables d'harmonie pour chaque fréquence, qui peuvent se relier aisément aux déformées modales précédemment identifiées, notamment en basse fréquence. Naturellement, plus la fréquence augmente, plus le nombre de ventre augmente. Alors que les modes des trois harpes présentent des déformées modales assez proches (voir Tableau 1), ces cartes de conductance montrent des comportements vibratoires très différents, aussi bien localement que globalement. Par exemple, la table d'harmonie de la harpe Massango semble être globalement plus mobile que pour les deux autres harpes. On s'attendra

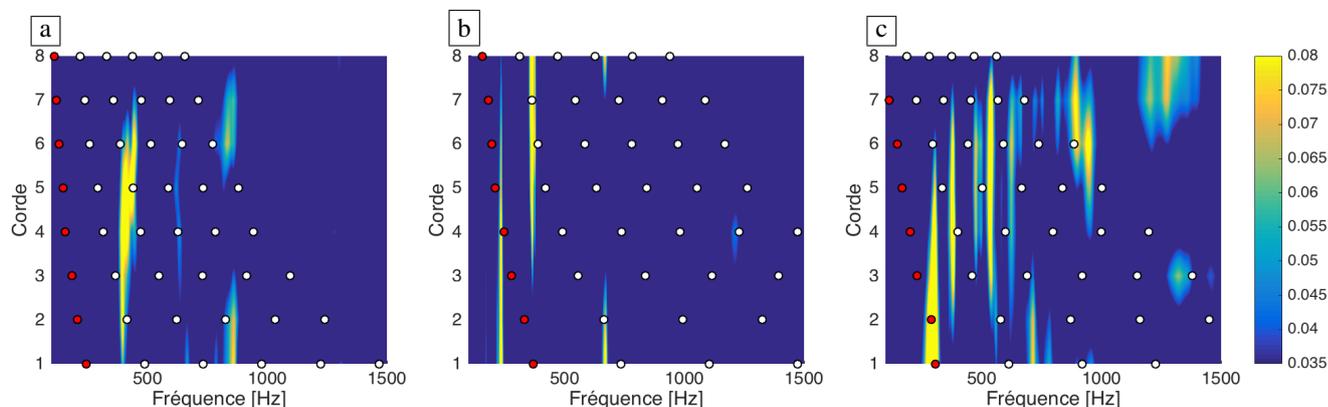


FIGURE 4 – Conductance co-localisée au pied de chaque corde en fonction de la fréquence pour les harpes [a] Tsogho, [b] Fang et [c] Massango. La fréquence fondamentale de chaque corde est indiquée par un point rouge, les cinq premiers partiels par des points blancs.

donc à un couplage plus fort des cordes et donc, à un rayonnement plus important de l'instrument. De manière locale, lorsqu'il y a coïncidence entre la position et la fréquence du fondamental ou d'un partiel de corde et une zone de forte mobilité, on peut s'attendre que, pour cette fréquence, le fondamental ou le partiel rayonne fortement mais que, dans le même temps, cette composante s'atténue rapidement. Ce qui peut introduire certaines variations de timbre entre deux notes consécutives, et donc une certaine inhomogénéité de l'instrument [13, 15].

Pour les harpes Fang et Tsogho, il apparaît pour le premier mode de flexion (1F) des déformées modales quasiment identiques à des fréquences différentes (décalage d'une dizaine de Hertz pour la harpe Tsogho et de 70 Hz pour la harpe Fang), voir Tableau 1. Ce phénomène peut s'expliquer par la présence d'un couplage vibro-acoustique entre le premier mode de la table d'harmonie et le premier mode de cavité et souvent identifié comme modes A0 et T1 [19]. Ces modes permettent, en général, d'améliorer le rayonnement basse fréquence de l'instrument, en dessous du premier mode de la table d'harmonie [15]. Cependant, dans le cas des harpes d'Afrique centrale à notre disposition, le ventre du premier mode s'avère positionné au delà du point d'accroche de la corde la plus grave (corde 8) comme indiqué sur les cartes d'admittances de la figure 4. Il semble donc que le réglage de l'instrument ne semble pas optimum en ce sens. De plus, alors que pour les harpes Fang et Massango, ce premier mode participe au rayonnement du fondamental de quelques cordes, pour la harpe Tsogho, ce premier mode qui a une fréquence assez élevée par rapport à l'accord des cordes, semble favoriser uniquement les partiels. Ce résultat entrainera là encore, des différences de timbre entre les instruments.

La mobilité moyenne de chaque instrument a été calculée, sur la plage de fréquence [500 Hz-2000 Hz], à partir des mobilités co-localisées mesurées au pied de chaque corde et montrée dans la figure 5. Globalement, on retrouve le résultat précédemment établi avec les cartes d'admittance : la harpe Massango présente une valeur de mobilité moyenne plus élevée que pour les deux autres harpes. De plus, pour cette harpe mais aussi pour la harpe Tsogho, la valeur de MVM reste quasiment stable pour toutes les cordes, alors que pour la harpe Fang cette valeur a tendance à diminuer vers les cordes les plus graves. Au pied de la corde 8, plusieurs configurations expérimentales

ont été testées : variation de la force d'impact, mesure avec ou sans potence et avec différents embouts du marteau. Il s'avère que la harpe Fang présente la plus grande variation (écart-type à 1,73) suivit par la harpe Massango (écart-type à 0,95) puis la harpe Tsogho (écart-type à 0,45). Bien que cette variabilité dans la valeur de MVM soit importante (sûrement liée à un comportement non linéaire des peaux), les harpes restent encore bien discernables. Le résultat est sensible au protocole expérimental mais permet tout de même de garder un jugement relatif entre instrument. Les harpes restent bien discriminés par cet indicateur avec la harpe Massango plus mobile que la harpe Tsogho indépendamment de la corde. D'après [17], la mobilité caractéristique est inversement proportionnelle à la racine carré de la masse équivalente de la table d'harmonie. Ainsi, la masse équivalente de la table d'harmonie de la harpe Massango serait inférieure à celle de la harpe Tsogho.

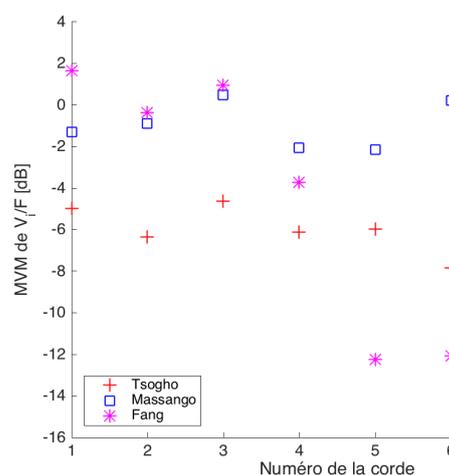


FIGURE 5 – Mobilité moyenne (MVM) calculée à partir des mobilités co-localisées au pied des 8 cordes. Pour la corde 8, variabilité du résultat en fonction de conditions expérimentales. Ref dB :  $1.10^{-3}$  m/s.

## 5 Conclusion

Dans cette étude sur trois harpes provenant de trois populations du Gabon (Massango, Fang et Tsogho), les

propriétés vibratoires ont été analysées. De constitution proche, ces trois instruments présentent néanmoins certaines particularités vibratoires qui ont été identifiées. Tout d'abord, les harpes Tsogho et Massango semblent plus proches que la harpe Fang. En effet, ces deux harpes ont une table d'harmonie dont le comportement vibratoire est proche d'une plaque mince alors que pour la harpe Fang elle s'apparenterait à une membrane. De plus, les harpes Massango et Tsogho présentent des mobilités moyennes homogènes le long de l'instrument et peu variables en fonction du protocole expérimental. Dans le détail la harpe Massango présente une mobilité plus élevée que celle de la harpe Tsogho, révélant une masse surfacique plus faible. Dans le même temps, la harpe Massango présente des fréquences modales plus faibles que pour la harpe Tsogho, montrant que la rigidité de la table d'harmonie de la harpe Massango est, là encore, plus faible pour des dimensions proches. La harpe Fang, quant à elle, présente une mobilité moyenne très variable le long de son axe central et dépendant des conditions expérimentales, pouvant être liée à un certain comportement non linéaire de la table d'harmonie. Cette hypothèse sera à approfondir dans les travaux à venir. Dans le but de prendre en compte l'acoustique de l'instrument dans l'étude de ses processus évolutifs, l'étude des mobilités le long des cordes semble une approche pertinente qui devra être validée sur un échantillon plus grand d'instruments.

## Remerciements

Ce travail, inclus dans le projet Kundi - Diversité et évolution des harpes d'Afrique centrale - a bénéficié d'une aide de l'Etat accordée à Sorbonne Universités et gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre de l'Idex SUPER dans le cadre du programme « Investissement d'avenir » (référence ANR-11-IDEX-0004-02).

## Références

- [1] S. Le Bomin, E. Lechaux, M-F Mifune, Ce que faire ensemble peut vouloir dire en musique. Trois études de cas en Afrique centrale, *Cahiers d'ethnomusicologie*, 21, pp.175-204, 2008
- [2] M-F Mifune, Corps et performance dans le culte du bwiti fang (Gabon), dans *Quand la musique prend corps*, M. Desroches, S. Lacasse, S. Stévanec (éd), Les Presses de l'Université de Montréal, pp. 347-364, 2014
- [3] F. Bikoma et S. Le Bomin, *Musiques myéné de Port-Gentil à Lambaréné*, Sépia, Saint-Maur-des-Fossés, 2004.
- [4] P. Bruguière et G. Speranza (éd), *La parole du fleuve. Harpes d'Afrique centrale*, Cité de la musique - Musée de la Musique, Paris, 1999.
- [5] S. Arom, L'étude des échelles dans les musiques traditionnelles : une approche interactive, *Analyse Musicale*, 23, pp. 21-24, 1991.
- [6] S. Arom, Le "syndrome" du pentatonisme africain, *MusicaeScientia(The Journal of the European Society for the Cognitive Sciences of Music)*, 1(2), p. 139-163, 1997.
- [7] S. Arom et S. Fürniss, The pentatonic system of the Aka Pygmies of the Central African Republic, Dans *European Studies in Ethnomusicology : Historical Developments and Recent Trends*. M. P. Baumann, A. Simon, U. Wegner (éd.), Wilhelmshaven : Florian Noetzel Edition, pp. 159-173, 1992.
- [8] S. Arom, G. Léothaud et F. Voisin, Experimental ethnomusicology. An interactive approach to the study of musical scales, Dans *Perception and Cognition of Music*, I. Deliège et J. Sloboda (éd.), Hove (U.K.), Erlbaum, Taylor and Francis, pp. 3-30, 1997.
- [9] S. le Bomin, Permutations expérimentales à l'aide d'un instrument traditionnel : la harpe des Banda Gbambiya de République Centrafricaine, *MusicaeScientia(The Journal of the European Society for the Cognitive Sciences of Music)*, 1, pp. 35-42, 2000.
- [10] P. Guillaume, P. Verboven, S. Vanlanduit, H. Van der Auweraer et B. Peeters, A poly-reference implementation of the least-squares complex frequency-domain estimator, *In proceedings of the IMAC XXI* in Kissimmee, Florida, 2003.
- [11] A. Paté, J-L. Le Carrou, B. Fabre, Predicting the decay time of solid body electric guitar tones, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135(5), pp.3045-3055, 2014.
- [12] J-L. Le Carrou, Q. Leclère, F. Gautier, Some characteristics of the concert harp's acoustic radiation, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127(5), pp. 3203-3211, 2010.
- [13] S. Daltrop, A. Kotlicki et C. Waltham, Vibro-acoustic characteristics of an Aoyama Amphion concert harp, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 128(1), pp. 466-473, 2010.
- [14] I.M. Firth, On the Acoustics of the harp, *Acustica*, 37, pp.148-154, 1977
- [15] J-L. Le Carrou, F. Gautier, J. Dugot, S. Le Conte et J. Francois, Vibratory study of harp's soundboxes, *In proceedings of the ISMA* in Sydney and Katoomba, Australie, 2010.
- [16] J-L. Le Carrou S. Le Conte et J. Dugot, 18th and 19th french harp classification using vibration analysis, *Journal of Cultural Heritage*, 27S, pp. S112-S119, 2017.
- [17] E. Skudrzyk, The mean value method of predicting the dynamic response of complex vibrators, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 67(4), 1105-1135, 1980.
- [18] B. Elie, F. Gautier et B. David, Macro parameters describing the mechanical behavior of classical guitars, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 132(6), 4013-4024, 2012.
- [19] J-L. Le Carrou, F. Gautier et E. Foltête, Identification of A0 and T1 modes in the concert harp, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121(1), pp. 559-567 (2007).