
Acoustique des harpes d'Afrique centrale (Projet Kundi)

RAPPORT DE STAGE

Auteur :
Daniel BEDOYA

Maître de stage :
Jean-Loïc LE CARROU

Master Sciences pour l'ingénieur (SPI)
Orientation Acoustique

Équipe Lutherie – Acoustique – Musique
Institut Jean Le Rond D'Alembert
Université Pierre et Marie Curie UPMC

02 mai – 28 juillet 2017

Année Universitaire : 2016 - 2017

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé d'une manière ou d'une autre, lors de mon stage et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce document.

Tout d'abord, j'adresse mes remerciements à mon maître de stage Jean-Loïc Le Carrou, de l'Université Pierre et Marie Curie PARIS 6, qui m'a donné l'opportunité de participer dans ce Projet, en totale adéquation avec mon projet professionnel, et qui par la suite m'a beaucoup aidé dans la recherche bibliographique et dans la compréhension de la problématique, des aspects théoriques et pratiques tout au long de mon stage.

Je tiens à remercier l'équipe Lutheries - Acoustique - Musique (LAM), pour son accueil, pour me donner l'occasion d'acquérir de nouvelles connaissances et compétences, et en particulier, M. Laurent Quartier pour son aide et collaboration opportunes. Merci également à tous les stagiaires (Maxime, Victor, Pierre, Argan, Mathis) avec qui j'ai partagé des moments très sympathiques. Grâce aussi à Marie-France Mifune et toute l'équipe du Musée de l'Homme, pour nous avoir confié les trois harpes du Gabon et pour m'avoir accueilli dans leurs séminaires, où j'ai pu beaucoup apprendre sur le travail multidisciplinaire de ce projet.

Finalement, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont corrigé et relu ce rapport de stage : ma femme et encore mon maître de stage.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Contexte	1
1.2	Structure générale d'une harpe	1
1.3	Description des harpes	1
1.4	Facture instrumentale	3
1.5	Objectif du stage	4
2	Modélisation	7
2.1	Table d'harmonie	7
2.2	Effort de jeu	8
2.2.1	Vibration des cordes	8
2.2.2	Corde pincée	8
2.2.3	Force transmise à la table d'harmonie	9
3	Étude expérimentale	10
3.1	Analyse modale expérimentale	10
3.1.1	Méthodes d'analyse modale expérimentale	11
3.1.2	Mesures	14
3.2	Analyse de réponse en fréquence	15
3.3	Étude de mobilité	16
4	Résultats	17
4.1	Analyse modale expérimental	17
4.1.1	Déformées modales	18
4.1.2	Rapport des fréquences	18
4.1.3	Variation de fréquence	19
4.2	Analyse de réponse en fréquence	19
4.2.1	Spectrogramme et spectre du transitoire	20
4.3	Comparaison LSCF-Lissage	20
5	Descripteur vibratoire	22
5.1	Cartes de mobilité	22
5.2	Mobilité moyenne	23
5.3	Variation de Mobilité moyenne	23
6	Conclusions et perspectives	24
6.1	Conclusions	24
6.2	Perspectives	24
A	Photographies complémentaires	26
A.1	Caractéristiques physiques	26
A.2	Facture instrumentale	28
B	Paramètres de la harpe	29
B.1	Paramètres organologiques	29
B.2	Accordage des harpes	30

C	Étude expérimentale	32
C.1	Ressources	32
C.2	Résultats analyse modale	32
C.3	Rapport des fréquences	35
C.4	Protocole expérimental	36
C.4.1	Maillage des harpes	36
C.4.2	Montage	37
C.4.3	Diagrammes de stabilité	38
C.5	Comparaison entre techniques de mesure	39
C.6	Comparaison des conditions de mesure	40
C.7	Résultats de l'identification modale par lissage	41
C.8	Résultats de l'identification modale par spectre	51
C.8.1	Spectrogramme	51
C.8.2	Spectre	52
C.9	Cartes de mobilité	54

Résumé et abstract

Résumé

Dans le cadre du ‘Projet Kundi - diversité et évolution des harpes d’Afrique centrale’, ce document étudie les propriétés acoustiques de trois harpes de différentes ethnies du Gabon, avec le but de trouver des descripteurs acoustiques permettant de mieux comprendre leur comportement vibratoire, même si parfois il n’est pas possible de les mettre en condition de jeu.

Premièrement, les instruments, la facture instrumentale et leurs caractéristiques principales sont décrits en détail. Deuxièmement, on se concentre sur la modélisation théorique et puis on aborde la partie expérimentale de ce document, qui est composée de trois points de vue du problème : L’analyse modale avec les méthodes LSCF et lissage des fonctions de transfert, l’analyse de réponse en fréquence des signaux temporels d’accélération et l’étude de mobilité de toutes les cordes pour les trois harpes du Gabon.

Pour finir, on présente une analyse des résultats obtenus où on remarque les avantages et inconvénients de chaque approche en contexte. Cela nous amène aux conclusions et perspectives pour la suite du projet.

Abstract

As a part of the ‘Project Kundi – diversity and evolution of central African harps’, this document studies the acoustic properties of three harps of different Gabon ethnicities, with the objective of finding acoustic descriptors which allow the better understanding of their vibrational behavior, even if we’re often incapable of setting them in playing conditions.

Firstly, the instruments’ fabrication and principal characteristics are described in detail. Secondly, we focus on the theoretical modeling and furtherly confront the experimental analysis of the document, which is composed of three points of view on the problem : Experimental modal analysis with the methods LSCF and transfer functions smoothing, the analysis of the acceleration signals’ frequency response and the study of the mobility for all the strings of each harp of Gabon.

Finally, the obtained results analysis is presented, where the advantages and disadvantages of each approach are remarked in context. This brings us to the conclusions and perspectives for the continuation of the project.

Avant-propos

Institut Jean le Rond d'Alembert

Ce stage a été réalisé grâce à l'accueil d'une des équipes de l'Institut Jean le Rond d'Alembert (le laboratoire de recherche en mécanique le plus grand d'Île-de-France)¹ : L'équipe Lutheries - Acoustique - Musique (LAM).

Dans le LAM, de nombreux chercheurs travaillent sur des thématiques liées au son et à la musique, étudiées non seulement d'un point de vue scientifique, mais avec un regard complémentaire sur les sciences humaines. Cette double approche est possible grâce à la collaboration de l'UPMC, du CNRS et du Ministère de la culture².

Dans l'esprit de collaboration interdisciplinaire du LAM, au sein du 'Projet Kundi', les instruments musicaux étudiés dans ce stage font partie d'une des collections du Musée de l'Homme du Réseau National d'Histoire Naturelle.

1. <http://www.dalembert.upmc.fr/>

2. <http://www.lam.jussieu.fr/>

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte

Dans la pratique de certains cultes du Gabon, notamment le *Bwiti* ou l'*Ombwiri* [1], la musique est une partie essentielle. La plupart des rituels, soient de passage, soient destinés au soin des malades, utilisent des instruments musicaux comme la harpe, l'arc et la poutre sacrés qui constituent un patrimoine culturel des différentes ethnies du Gabon.

Diverses études de type anthropologique et ethno-musicologique ont été faites par des chercheurs comme Swlderski [1], Sallé [2] et Mifune [3], dans le but de comprendre ces différentes traditions et coutumes. Leur travail nous permet d'avoir une vision globale des ethnies et de connaître les détails et les motivations dans leur manière de construire et interpréter ces instruments.

Les harpes du Gabon que l'on trouve dans les collections des musées¹ ont des vastes attributs morphologiques et acoustiques qui sont issus d'une riche histoire culturelle. Néanmoins, il est possible d'analyser ces pièces individuellement pour les cataloguer à partir de certaines similitudes liées notamment à la caisse de résonance, la table d'harmonie et les cordes.

Actuellement, dans le cadre du 'Projet Kundi - diversité et évolution des harpes d'Afrique centrale', on s'intéresse à l'étude des propriétés acoustiques des harpes sacrées, appelées *ngòmbi* dans la langue Bantu [4].

1.2 Structure générale d'une harpe

Le principe de fonctionnement des instruments à cordes est similaire pour la plupart d'entre eux ; la harpe est un instrument à cordes pincées de forme généralement triangulaire. Ces cordes sont attachées d'une part aux chevilles sur le manche et d'autre part à la surface vibrante connue comme table d'harmonie. Les vibrations sont après rayonnées soit directement, soit par une résonance de cavité [5]. Il est important de noter qu'à la différence des lyres, les harpes n'ont pas de chevalet entre leurs deux extrémités [6].

Par la suite, on utilisera les termes qui décrivent les principales parties des harpes occidentales, adaptés pour présenter les harpes africaines. On peut voir une représentation approximative de la géométrie d'une harpe africaine affichée dans la figure 1.1, notamment on remarque la variation de l'angle θ d'inclinaison de la table d'harmonie par rapport aux différentes harpes et à la présence d'une poutre au milieu de la peau pour supporter les cordes.

1.3 Description des harpes

On a eu accès à trois harpes d'Afrique centrale qui font partie de la collection du Musée de l'Homme pour faire cette étude acoustique. Chacune des harpes provient d'une région différente du Gabon que l'on distingue

1. <http://collectionsdumusee.philharmoniedeparis.fr/> ; <http://www.carmentis.be/eMuseumPlus>

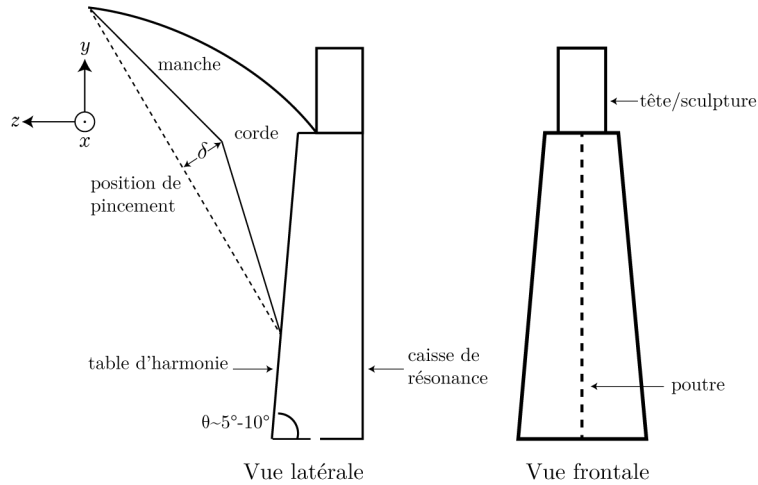


FIGURE 1.1 – Géométrie et système de coordonnées pour la table d’harmonie et une corde pincée

selon l’ethnie qui les a fabriquées.

D’abord pour l’étude acoustique, on se concentrera sur la description générale de la caisse de résonance, la table d’harmonie (avec ses ouïes) et les cordes. Ensuite, on va présenter les différences les plus importantes entre les trois harpes (voir photos complémentaires, placées en annexe A et le tableau B.4).

Éléments communs à toutes les harpes

— Cordes

Autrefois, les harpes africaines étaient munies de cordes faites en boyau d’origine animale ou végétale [4]. De nos jours, elles sont souvent faites de matériaux réutilisés comme le nylon qui est employé comme fil de pêche. En effet, les harpes étudiées pour ce stage ont huit cordes, faites en fil de pêche, tendues obliquement entre le manche et la caisse de résonance ; fixées avec des chevilles au manche et attachées à une poutre encastrée à la caisse de résonance. La numérotation des cordes se fait de 1 à 8, en partant de la plus petite corde (voir tableau B.1). L’accordage diffère entre les harpes, cependant les cordes 7 et 8 sont toujours les octaves des cordes 1 et 2 respectivement (voir tableaux B.5, B.6 et B.7).

— Table d’harmonie

La table d’harmonie est constituée de la peau d’un animal (chèvre, antilope, gazelle ou même serpent)[1]. Pendant la fabrication, elle est d’abord tendue et puis fixée à la caisse de résonance avec des clous, ensuite le luthier enlève les poils à l’aide d’un couteau avec lequel il perce finalement les ouïes de différentes formes selon l’ethnie (voir fig 1.5 et tableau B.3). À noter que la tension statique des cordes applique une précontrainte à la table d’harmonie qui est toutefois inférieure à celle des harpes occidentales.

— Caisse de résonance

Toutes les harpes étudiées ont une caisse de résonance de forme parallélépipède provenant chacune d’un seul morceau de bois. Le facteur va tracer sa forme sur un tronc adapté et après il va la sculpter et creuser soigneusement avec des outils simples comme par exemple une hache, une machette, une scie et des ciseaux.

Harpe Fang

Cette harpe a la table d’harmonie la plus grande des trois instruments (voir figure 1.2.b). Sur une extrémité de la caisse de résonance on voit une sculpture anthropomorphe féminine représentant la vierge (voir figure 1.3.a) qui porte un voile et une couronne et a les mains en position de prière. C’est donc un exemple très clair du syncrétisme présent dans les ethnies du Gabon [3]. Il y a trois ouïes elliptiques sur la table d’harmonie (voir fig 1.5.a, 1.5.b et tableau B.1). Cette harpe est peinte en blanc. Les détails de l’accordage de la harpe se trouvent dans le tableau B.5.

Harpe Tsogho

C'est la harpe avec le manche le plus grand et contrairement aux autres harpes, elle n'a aucune sculpture anthropomorphe (voir figure 1.2.a). On peut remarquer la présence de poils sur une grande partie de la peau qui forme la table d'harmonie (fig 1.4.b) alors que normalement ils sont enlevés quand le facteur l'a fixé sur la caisse de résonance. Il y a une ouïe elliptique sur la table d'harmonie (voir fig 1.5.c) et un orifice qui s'est probablement formé lorsque la peau a séché. L'instrument a très peu de décoration mais on voit deux astérisques sur la caisse de résonance et l'utilisation de feuilles de palmier pour fixer le manche et couvrir les clous qui fixent la peau (fig 1.4.a). Les détails de l'accordage de la harpe se trouvent dans le tableau B.6.

Harpe Massango

Cette harpe a la table d'harmonie la plus petite des trois instruments, elle a une sculpture anthropomorphe qui a des traits masculins (fig 1.3.b) sur une extrémité de la caisse de résonance (voir figure 1.2.c). Il y a une seule ouïe rectangulaire sur la table de résonance qui peut avoir été mise en place pour changer les cordes (voir fig 1.5.d). La peau est fixée par des clous. La harpe a une décoration particulière sur la caisse de résonance et une finition avec un vernis noir. Les détails de l'accordage de la harpe se trouvent dans le tableau B.7.



FIGURE 1.2 – a) Harpe Tsogho, b) Harpe Fang, c) Harpe Massango

1.4 Facture instrumentale

La fabrication des harpes du Gabon est faite de manière artisanale et chaque ethnie a ses propres techniques. Dans cette section, on ne va décrire que l'approche Fang. Néanmoins, étant donné l'existence d'étapes communes pour les trois harpes, dans notre cas on va généraliser le processus et ne pas s'occuper des distinctions entre ethnies dans cette partie.

Tout d'abord, le facteur va prendre un grand morceau de bois (habituellement en bois de *Alchornea caloneura* Pax [2]) qui constituera le corps de la harpe, il utilise une machette pour scier la forme globale de l'instrument et une hache pour creuser la caisse de résonance (voir fig A.4 en annexe). Ensuite, il fait une entaille pour le manche et la sculpture anthropomorphe et il procède à affiner ces détails avec un cutter (voir figure A.5 en annexe).



FIGURE 1.3 – Sculptures anthropomorphes. a) Harpe Fang b) Harpe Massango

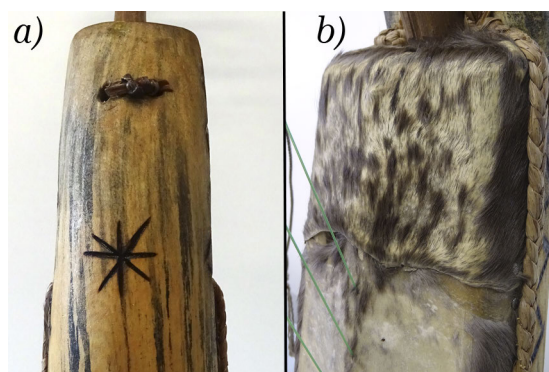


FIGURE 1.4 – Harpe Tsogho. a) Décoration caisse de résonance b) Peau de la table d'harmonie

Quand la cavité de la caisse de résonance est finie, le facteur coupe, perce et puis encastre une poutre en bois de padouk aux extrémités de la caisse de résonance comme support pour les cordes (voir fig 1.6).

Pour continuer, le facteur prend la peau qui va couvrir la table d'harmonie, il l'accroche aux extrémités de la caisse de résonance avec des clous en prenant soin de bien la tendre (voir fig 1.7).

Une fois que le corps est prêt, pour fabriquer le manche, le facteur utilise un morceau de bois courbe où il repère et perce les orifices pour les cordes. Puis, il procède à fixer le manche au corps de la harpe avec un fil en métal. Finalement, il attache les cordes entre la table d'harmonie et le manche en utilisant des chevilles faites en bois, pour accorder l'instrument (voir fig 1.8).

1.5 Objectif du stage

Même si les comparaisons organologiques peuvent nous donner des informations importantes sur des instruments de musique, il peut être pertinent de les compléter par des caractéristiques mécaniques.

L'objectif de ce document est donc de proposer des descripteurs acoustiques permettant de caractériser les harpes du Gabon ; de cette manière, à partir de l'étude de trois exemplaires on pourra comparer le corpus des instruments du 'Projet Kundi'. Cependant, à partir du moment où l'on travaille avec des objets appartenant à des collections de musées (n'étant pas souvent en condition de jeu) ou instruments personnels, il faut considérer que la gamme de techniques applicables pour étudier leur propriétés acoustiques sera réduite. Nous allons appliquer des techniques de mesures non destructives et utilisables sur site en Afrique.

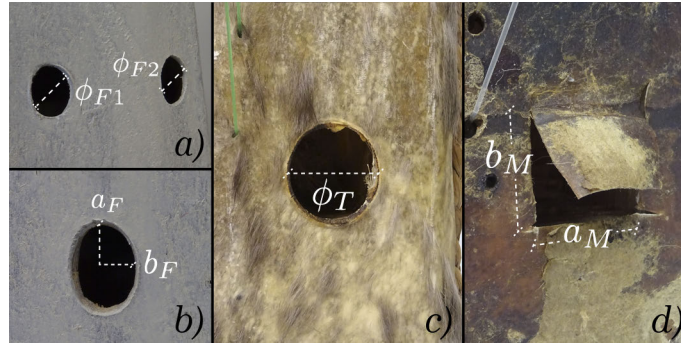


FIGURE 1.5 – Ouïes. a) et b) Harpe Fang b) Harpe Tsogho c) Harpe Massango



FIGURE 1.6 – Étapes de fabrication de la caisse de résonance

En conséquence, on utilisera des modèles théoriques et comparera différentes techniques de mesure pour essayer de trouver des procédures reproductibles et consistantes avec les structures que l'on analyse.

Plan du rapport

Les différentes parties du rapport seront organisées de manière à pouvoir suivre l'ensemble des activités réalisées pour atteindre l'objectif de ce stage.

Tout d'abord on va proposer une modélisation théorique des instruments en prenant en compte le comportement vibratoire des tables d'harmonie de manière isolée. Cela nous donnera un point d'entrée et de repère auquel on reviendra à la fin pour interpréter les données.

Par la suite, on va examiner toutes les procédures d'approche expérimentale, dans l'intention de distinguer ses avantages et inconvénients pour le cas spécifique des harpes du Gabon.

Ultérieurement, on va présenter les résultats obtenus et extraire les descripteurs qui nous donneront l'occasion de comparer les harpes entre elles. Finalement, la dernière partie portera sur les conclusions obtenues lors de cette recherche et les perspectives; non seulement du stage mais aussi du 'Projet Kundi' sur l'évolution des harpes d'Afrique centrale.



FIGURE 1.7 – Étapes de fabrication de la table d'harmonie

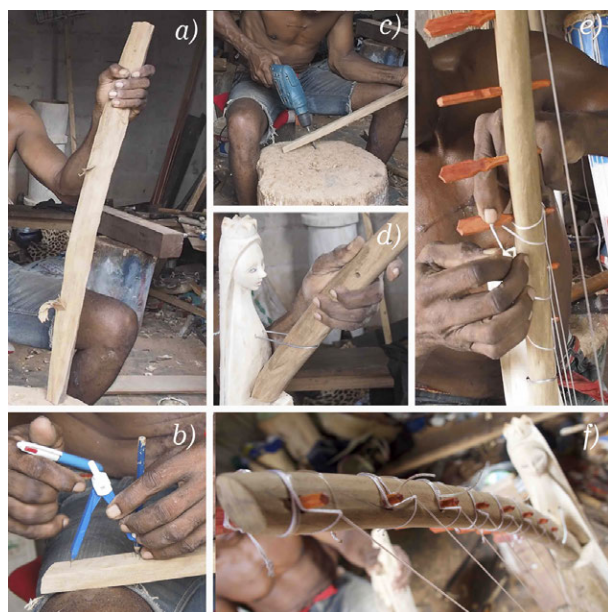


FIGURE 1.8 – Étapes de fabrication du manche

Chapitre 2

Modélisation

Dans ce chapitre, on va se concentrer sur la représentation théorique de la vibration de la table d'harmonie et de l'effort de jeu appliqué par la tension des cordes. D'abord on va présenter les équations décrivant la relation des fréquences naturelles théoriques que l'on comparera par la suite avec les résultats expérimentaux.

2.1 Table d'harmonie

On considère la table d'harmonie comme une membrane fixée aux bords.

En considérant le cas d'une membrane mince de masse volumique ρ , surface S , dimensions L_x et L_z et déplacement transversal $w(x, z, t)$, soumise à une même tension τ par unité de longueur, on peut établir son équation de mouvement en coordonnées cartésiennes comme[7] :

$$\Delta w = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}$$

avec $c = \sqrt{\frac{\tau}{\rho S}}$.

Pour des conditions aux limites ($w_{(x=0)} = w_{(x=L)} = w_{(z=0)} = w_{(z=L)} = 0$), la solution analytique en variables séparées, s'écrit :

$$w(x, z, t) = A \sin(k_x x + \phi_x) \sin(k_z z + \phi_z) e^{j\omega t}$$

où $|A|$ est l'amplitude maximale de déplacement, k est le vecteur d'onde ($k^2 = k_x^2 + k_z^2$) et ϕ est la phase. Enfin, on a les fréquences naturelles f_{nm} :

$$f_{nm} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_z}\right)^2}$$

On peut voir dans le tableau 2.1 les fréquences normalisées pour une membrane rectangulaire des dimensions $L_x = 10$ [cm] et $L_z = 40$ [cm], ce qui correspond aux mesures de la table d'harmonie Massango. En effet, si l'on remplace les valeurs de largeur et longueur de la membrane pour celles des autres harpes, ce rapport ne varie presque pas.

Rapport de fréquences $f_{m,n}/f_1$					
m \ n	1	2	3	4	5
1	1	1,96	2,92	3,89	4,86
2	1,08	2	2,95	3,91	4,87
3	1,21	2,07	3	3,95	4,9
4	1,37	2,17	3,07	4	4,95
5	1,55	2,29	3,15	4,06	5

TABLE 2.1 – Fréquences normalisées pour une membrane rectangulaire

2.2 Effort de jeu

Quelle est l'influence de la précontrainte de la table d'harmonie sur ce type de harpes ? On sait déjà que ce n'est pas négligeable sur les harpes occidentales et qu'à cause d'elle, la table d'harmonie a une tendance à se casser ou se déformer [8].

Pour classer les résultats des mesures avec les différentes forces appliquées dans les conditions normales de jeu, on calcule la force appliquée par les cordes à la table d'harmonie.

2.2.1 Vibration des cordes

L'équation du mouvement d'une corde *idéale* avec ses deux extrémités encastrées, écartée verticalement de sa position d'origine $y(x, t)$ s'écrit :

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (2.1)$$

Avec $c = \sqrt{\frac{T}{\rho S}}$ la célérité des ondes transversales où T est une tension uniforme, ρ est la masse volumique et S est la section droite constante. On ne considère pas d'amortissement. Les pulsations propres de la corde pour une longueur L sont de la forme :

$$\omega_n = \frac{n\pi c}{L} \quad (2.2)$$

2.2.2 Corde pincée

On considère le déplacement de la corde lors d'un pincement idéal comme dans la figure 1.1, sans vitesse initiale à l'abscisse x_0 et sans prendre en compte sa raideur intrinsèque (2.1). On cherche les solutions de l'équation 2.1 de la forme $y(x, t) = \sum_n \Phi_n(x)q_n(t)$, avec $\Phi_n(x)$ les modes propres et $q_n(t)$ les facteurs de participation modaux.

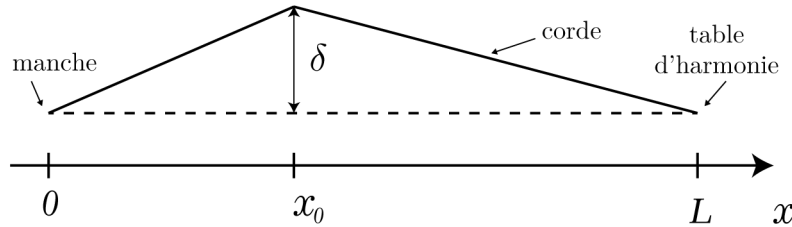


FIGURE 2.1 – Profil initial simplifié pour une corde pincée sans raideur (adapté de [9])

On prend maintenant les valeurs connues de la corde comme la longueur L , son diamètre ϕ (tableau B.1), la fréquence fondamentale d'accordage f (par corde et par harpe) et on utilise une valeur de masse volumique typique pour du nylon $\rho = 1200 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ ¹. Alors, la célérité des ondes dans la corde est $c = f/2L$ et la tension $T = c^2 \rho \pi (\phi/2)^2$.

Donc, avec la condition initiale $\dot{q}_0(0) = 0$, on peut calculer le déplacement transversal de la corde à partir de l'équation :

$$y(x, t) = \sum_n \frac{2\delta L^2}{n^2 \pi^2 x_0 (L - x_0)} \sin k_n x_0 \sin k_n x \cos \omega_n t \quad (2.3)$$

1. <http://www.goodfellow.com/fr/>

2.2.3 Force transmise à la table d'harmonie

On cherche la force sur l'extrémité attachée à la table d'harmonie, c'est à dire en $x = L$. La force est proportionnelle à la dérivée spatiale du déplacement ($\frac{\partial y}{\partial x}$) [9] :

$$F_T(L, t) = -T \sum_n \frac{2\delta L}{n\pi x_0(L - x_0)} \cos k_n L \sin k_n x_0 \cos \omega_n t \quad (2.4)$$

Pour un déplacement typique (mesuré sur une vidéo du facteur jouant la harpe) $\delta = 10$ [mm] et $x_0 = L/2$, on peut regarder les différentes forces appliquées pour chaque corde des harpes du Gabon sur la figure 2.2. On considère l'influence de l'angle d'inclinaison θ (tableau B.1) entre la table d'harmonie et la corde ($F = F_T \sqrt{1 + \cot^2(\theta)}$) et on remarque qu'aucune des cordes n'a de forces supérieures à 20 [N]. Ces forces sont très faibles par rapport à celle appliquée par les cordes des harpes occidentales.

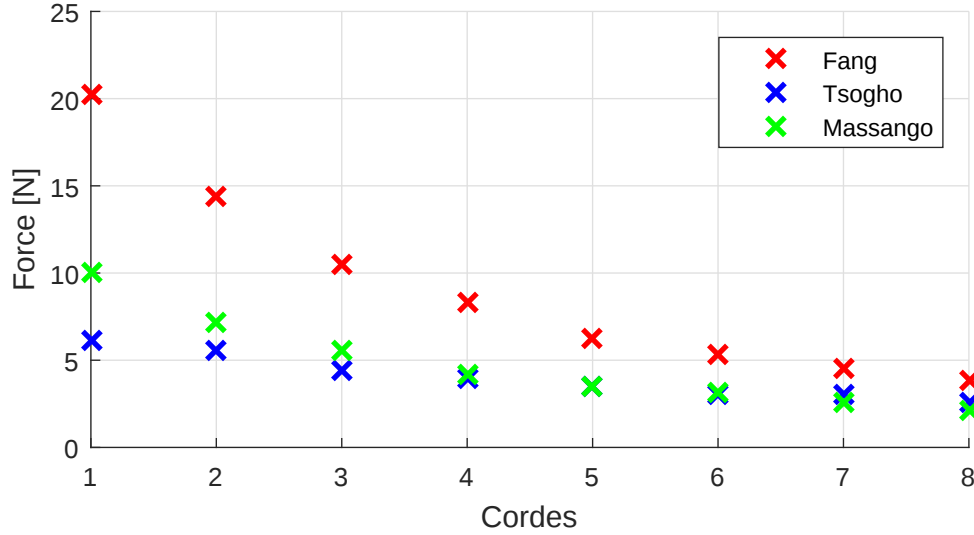


FIGURE 2.2 – Force maximale appliquée par les cordes à la table d'harmonie

Ces valeurs seront utiles pour contraster les résultats des mesures et l'amplitude de la force exercée expérimentalement. On les utilisera donc pour faire une comparaison avec les données de forces mesurées expérimentalement.

La modélisation théorique des différentes parties d'un instrument de musique est une étape très importante puisqu'elle nous permet d'établir une référence, applicable à toutes les harpes de ce type, à des fins de comparaison. La détermination des fréquences normalisées de la table d'harmonie et de l'effort de jeu ne requiert pas de connaître tous les paramètres élastiques des harpes ni dans une situation du laboratoire ; elle est donc tout à fait adaptée au cas de l'étude sur site. De toute façon, vu que l'on prend en compte seulement les cas idéaux, on pourrait améliorer la précision des valeurs obtenues en utilisant des méthodes numériques.

Chapitre 3

Étude expérimentale

Dans ce chapitre on va décrire en détail les techniques appliquées et la procédure pour obtenir les données expérimentales qui permettent de caractériser des structures vibrantes. On a décidé d'utiliser trois approches au système : L'analyse modale expérimentale, les mesures en condition de jeu et les mesures de mobilité. Chacune des trois nous permet de regarder le problème avec une nouvelle perspective et nous donne des informations importantes sur le comportement vibratoire des instruments.

Protocole expérimental

Pour toutes les approches décrites, on a suivi un protocole expérimental similaire, avec certaines spécificités qui seront expliquées dans chaque section.

Tout d'abord il faut créer un maillage de points caractéristiques qui nous permettent de décrire le comportement vibratoire de la structure à analyser ; l'accéléromètre va être placé sur l'un de ces points.

On prend une distance maximale entre points de 3 cm pour avoir au moins six points par longueur d'onde et être capable d'établir une plage d'analyse jusqu'aux moyennes fréquences [10]. Ensuite, on a accordé les harpes et on a étouffé les cordes avec du feutre pour éviter leur vibration pendant l'expérience.

Finalement, pour se rapprocher de la condition libre, on a suspendu les trois harpes avec des élastiques (voir figure 3.1).

Remarques : À cause de la manière dont les cordes sont attachées au chevilles, on n'a pas pu répéter parfaitement, sur toutes les cordes, l'accordage réglé par les musiciens et enregistré par Marie-France Mifune sur place. En plus, les harpes Tsogho et Massango ne maintenaient pas l'accordage pour une période supérieure à 15 minutes (on a constaté une différence allant jusqu'à un ton sur quelques cordes) et donc il y a la possibilité que la précontrainte ait changé pendant l'expérience.

3.1 Analyse modale expérimentale

L'analyse modale permet de mieux comprendre le comportement vibratoire des structures à partir des paramètres modaux suivantes : fréquences propres, amortissements et déformées modales. On va la mettre en oeuvre pour le cas des harpes du Gabon avec l'objectif de pouvoir se rapprocher d'un modèle physique simple pour caractériser ces instruments.

Premièrement, on doit appliquer une force soit à l'aide d'un marteau d'impact, soit avec un pot vibrant et mesurer la réponse du système avec un accéléromètre. Deuxièmement, on va se servir de plusieurs méthodes pour analyser les données obtenues expérimentalement.

Finalement, pour valider la méthode décrite on pourrait comparer les résultats expérimentaux avec un modèle théorique développé avec la méthode des éléments finis. Puis, il serait possible de corriger les erreurs et d'interpréter les résultats des bases modales identifiées, en leur donnant un sens physique.

On commence par assimiler les échantillons à un système linéaire dissipatif à N ddl (degrés de liberté) dont le comportement peut être représenté par l'équation matricielle suivante :

$$M\ddot{q}(t) + C\dot{q}(t) + Kq(t) = f(t) \quad (3.1)$$

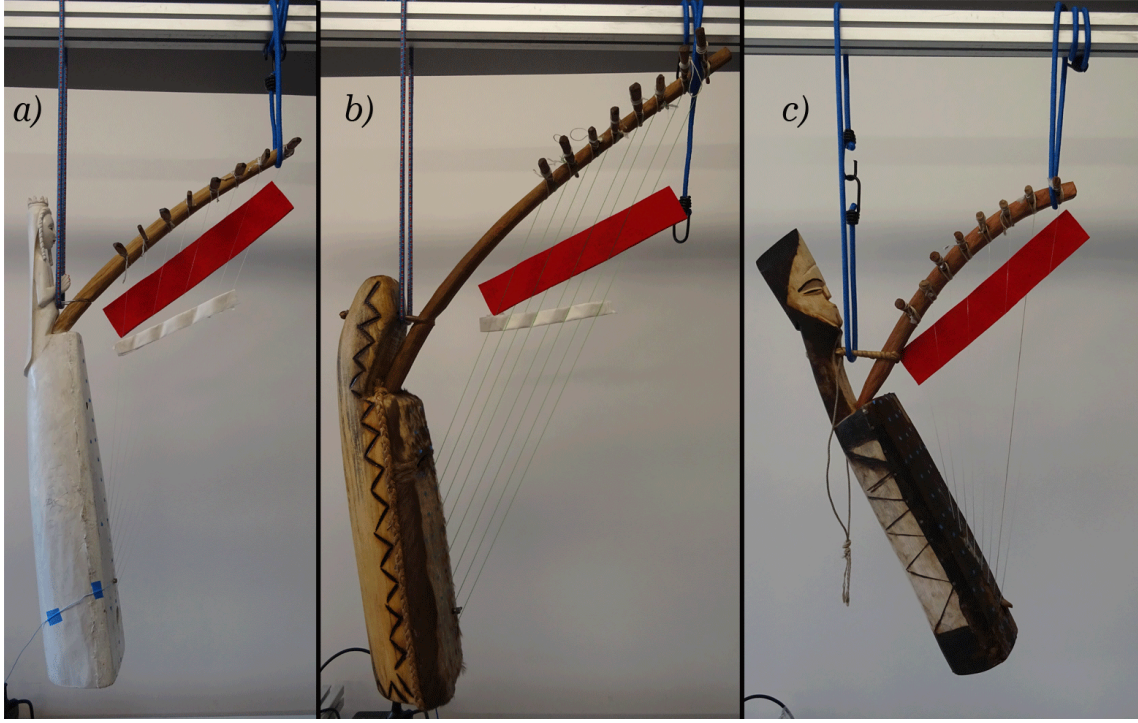


FIGURE 3.1 – Montage expérimentale des harpes pour les expériences
a) Harpe Fang b) Harpe Tsogho c) Harpe Massango

où M représente la matrice de masse, C la matrice d'amortissement et K la matrice de raideur, $f(t)$ représente le vecteur des forces excitatrices.

Dans le cas où $f(t) = 0$ et $q(t) = qe^{st}$ avec $s = j\omega$, l'équation caractéristique est de la forme :

$$[Ms^2 + Cs + K]q(t) = 0 \quad (3.2)$$

La solution de l'équation (3.2) est de la forme [11] :

$$s_n = -\xi_n\omega_n + j\hat{\omega}_n \quad (3.3)$$

où s_n représente les valeurs propres complexes de notre système et ω_n les pulsations propres du système, avec $\hat{\omega}_n = \omega_n\sqrt{1 - \xi_n^2}$.

Chaque valeur propre complexe s_n est associée à un vecteur propre complexe q_n . Le passage du mode propre complexe q_n au mode réel Φ_n se fait grâce à la formule suivante selon certaines hypothèses (notamment sur l'amortissement)[11] :

$$\Phi_n = \Re(q_n\sqrt{2j\omega_n}) \quad (3.4)$$

3.1.1 Méthodes d'analyse modale expérimentale

Il y a plusieurs méthodes pour déterminer des paramètres modaux des structures à partir des essais dynamiques. La classification la plus utilisée dans la littérature, décrit de méthodes temporelles et fréquentielles. Par la suite, on va mentionner quelques exemples mais on se concentrera sur la méthode appliquée pour notre analyse.

Méthodes temporelles : (pas utilisées dans cette étude)

- Méthode d'Ibrahim
- Méthode des moindres carrés complexes exponentiels

Méthodes fréquentielles : Les méthodes fréquentielles peuvent être utilisées pour calculer :

- Les solutions propres réelles complexes du système dissipatif
 - Méthodes d'appropriation
 - Méthodes de réduction des matrices M , B et K .
- Les solutions propres réelles du système conservatif
 - Méthodes de lissage des fonctions de transfert

Méthodes appliquées

- Méthode LSCF

La méthode LSCF (*Least Squares Complex Frequency*), utilisée par le logiciel MODAN, a été appliquée largement dans le cadre de ce stage. Cette méthode est vue comme une implémentation de la méthode temporelle LSCE (*Least Squares Complex Exponential*) dans le domaine fréquentiel. La première étape est la construction du diagramme de stabilité contenant, entre autres, les fréquences et les coefficients d'amortissement. Ensuite, les déformées modales sont trouvées par une méthode des moindres carrés basés sur une sélection de pôles stables.

Le diagramme de stabilité est un outil très important (cf figure 3.2), utilisé pour séparer les pôles du système physique des pôles du système mathématique. Quand on essaie d'estimer les paramètres modaux à partir des données réelles, il faut préciser l'ordre du modèle pour tenter d'adapter les modèles des ordres supérieurs qui contiennent plus de modes que ceux présents dans les données. Les pôles correspondants à un certain ordre du modèle sont comparés à ceux de l'ordre inférieur. Si leurs différences se situent dans des limites préétablies, le pôle est dit 'stable'. Les pôles parasites ne se stabiliseront pas au cours de ce processus et peuvent être réglés avec les données des paramètres modaux.

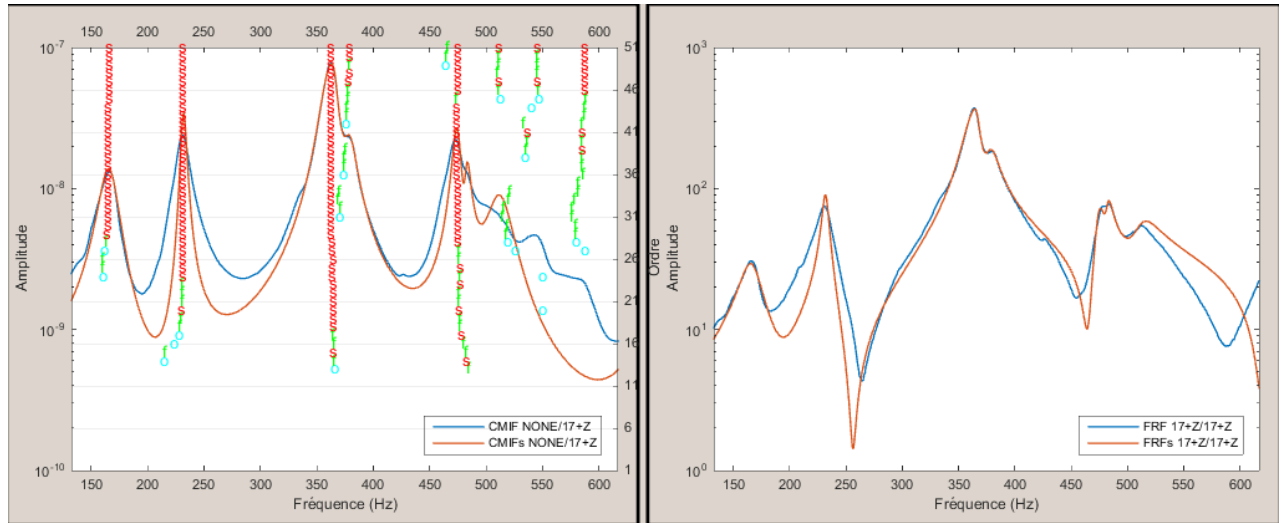


FIGURE 3.2 – Harpe Fang. a) Diagramme de stabilité b) FRF mesurée en bleu, FRF synthétisée en rouge

Pour la méthode LSCF, on a besoin des FRF (Fonctions de réponse en fréquence). Cette méthode identifie un modèle de fraction matriciel [12] :

$$[H(\omega)] = \frac{[B(\omega)]}{[A(\omega)]} \quad (3.5)$$

où $[H(\omega)]$ est la matrice FRF qui contient les FRF de tous les m points et de tous les l modes, $B(\omega)$ est le numérateur matriciel polynomial, $A(\omega)$ le dénominateur matriciel polynomial et $o = (1, \dots, l)$ les sorties du système. Chaque colonne de modèle de fraction matricielle peut être écrite telle que [12] :

$$\forall o = 1, 2, 3, \dots, l : < H_o(\omega) > = \frac{< B_o(\omega) >}{[A(\omega)]} \quad (3.6)$$

Le numérateur vecteur colonne polynomial de o et le dénominateur matriciel polynomial sont définis tels que :

$$\langle B_o(\omega) \rangle = \sum_{r=0}^p \Omega_r(\omega) \langle \beta_{or} \rangle \quad (3.7)$$

$$[A_o(\omega)] = \sum_{r=0}^p \Omega_r(\omega) [\alpha_r] \quad (3.8)$$

où $\Omega_r(\omega) = e^{j\omega\Delta t_r}$ sont les fonctions de base polynomiales et p l'ordre polynomial, avec Δt la période d'échantillonnage. Les coefficients polynomiaux β_{or} et α_r sont assemblés dans les matrices suivantes :

$$\beta_o = \begin{pmatrix} \beta_{o0} \\ \beta_{o1} \\ \dots \\ \beta_{op} \end{pmatrix} (\forall o = 1, 2, \dots, l),$$

$$\alpha = \begin{pmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \dots \\ \alpha_p \end{pmatrix}$$

L'interprétation du diagramme de stabilité nous donne les pôles et les facteurs de participation correspondants. Les déformées modales peuvent être trouvées grâce au modèle pôle-résidu. Ce modèle est une description de l'équation (3.5) dans le domaine de Laplace

$$[H(\omega)] = \sum_{i=1}^n \left(\frac{v_i \langle l_i^T \rangle}{j\omega - \lambda_i} + \frac{v_i^* \langle l_i^H \rangle}{j\omega - \lambda_i^*} \right) - \frac{LR}{\omega^2} + UR \quad (3.9)$$

où n est le nombre de modes, v_i sont les déformées modales, $\langle l_i^T \rangle$ sont les facteurs de participation modale, UR et LR sont les termes résiduels supérieur et inférieur qui s'approchent des effets des modes en dessous et au-dessus de la bande fréquentielle d'intérêt et λ_i sont les pôles qui sont complexes et conjugués et sont en fonction des pulsations propres ω_i et des coefficients d'amortissement ξ_i tels que [12] :

$$\lambda_i, \lambda_i^* = -\xi_i \omega_i \pm j \sqrt{1 - \xi_i^2} \omega_i \quad (3.10)$$

- Méthode de lissage des fonctions de transfert

Quel que soit le type d'excitation, on peut obtenir les fonctions de transfert entre chaque point d'entrée (force) et chaque capteur. Le lissage permet d'identifier les modes de la structure avec une ou plusieurs FRF mesurées. Malgré la quantité infinie des modes, cette méthode ne prend en compte qu'un nombre limité d'entre eux, délimité par une bande de fréquence choisie.

L'objectif de la méthode est, pour l'ensemble de capteurs, de pouvoir représenter la réponse forcée exacte du système, à partir seulement de la participation de n modes inclus dans la bande d'analyse et une contribution linéaire des modes extérieurs par rapport à $s = j\omega$:

$$q_i \approx u_i + s v_i + \sum_{n=1}^n \frac{t_{ni}}{s - s_n} \quad (3.11)$$

avec $t_{ni} = q_{ni} q_n^T f$ le produit du vecteur propre, sa transposée et la force. Ici, u_i , v_i et t_{ni} sont des inconnues qui dépendent de la position du capteur, et s_n qui ne dépend pas d'elle (équation (3.3)).

La méthode de lissage cherche à faire coïncider au mieux les réponses mesurées et calculées pour identifier l'ensemble des paramètres inconnus conjointement.

Alors, on peut implémenter un algorithme qui calcule de manière itérative les valeurs propres complexes du système non linéaire et puis le vecteur propre du système linéaire [11].

3.1.2 Mesures

Pour acquérir les données, on a frappé sur chaque point du maillage en tenant le marteau avec une main et en tirant légèrement de sa tête avec l'autre. L'accéléromètre reste au point de référence.

On a fait des mesures sur les trois harpes en considérant dans un premier temps la ligne centrale de la table d'harmonie et dans un second temps toute sa surface.

Au moment des mesures on s'est rendu compte que la surface des tables d'harmonie n'était pas complètement régulière et cela causaient des difficultés pour obtenir des courbes de force et accélération correctes, notamment pour le cas de la harpe Massango.

Cohérence Pour s'assurer de la qualité des mesures, on a calculé la cohérence $\gamma_{xy}^2(\omega)$ des signaux en comparant 10 mesures colocalisées successives de chacune des harpes.

Pour ce faire, d'abord on calcule la densité spectrale de puissance $S_{xx}(\omega)$ et $S_{yy}(\omega)$ comme le produit entre chaque spectre (accélération $a(\omega)$ et force $F(\omega)$ respectivement) et leur conjugués :

$$\begin{aligned} S_{xx}(\omega) &= \text{TF}[F(t)] \cdot \text{TF}[f(t)^*] \\ S_{yy}(\omega) &= \text{TF}[a(t)] \cdot \text{TF}[a(t)^*] \end{aligned} \quad (3.12)$$

Après on calcule l'interspectre $S_{xy}(\omega)$ comme le produit entre le spectre de la force $F(\omega)$ et le conjugué du spectre de l'accélération $a(\omega)$:

$$S_{xy}(\omega) = \text{TF}[F(t)] \cdot \text{TF}[a(t)^*] \quad (3.13)$$

Finalement, on utilise l'équation :

$$\gamma_{xy}^2(\omega) = \frac{|S_{xy}(\omega)|^2}{S_{xx}(\omega)S_{yy}(\omega)} \quad (3.14)$$

Pour que la cohérence soit considérée comme satisfaisante, la valeur de la courbe devrait être le plus proche de 1 que possible jusqu'à ce qu'elle descende rapidement à 0 (signaux dé-corrélés) quand il n'y a plus d'information traitable. On l'utilise donc pour définir le domaine fréquentiel utile du signal. Pourtant, le résultat de ce calcul pour la harpe Fang n'est pas acceptable après 1000 Hz. Pour cette raison, on a décidé de mettre en place un nouveau protocole expérimental.

Pour cette partie, on a procédé quasi exactement comme la première fois, sauf qu'on a utilisé une potence pour fixer le marteau (voir figure C.4). Par souci de simplification, on profite de la réciprocité du système et au lieu de déplacer le marteau à chaque mesure, on a déplacé l'accéléromètre point par point.

Postérieurement, on a calculé la cohérence de 10 mesures consécutives colocalisées sur le même point qu'auparavant et on a superposé ces courbes (figure 3.3). En effet, on peut remarquer que la deuxième technique appliquée était bien meilleure que la première à tel point qu'on a décidé de refaire les mesures pour l'analyse modale sur MODAN pour les trois harpes. On reviendra sur ce point en discutant les résultats des mesures.

Critères de mesure Dans cette étape de l'étude, on a établi des conditions constantes et variables qui servent à évaluer la susceptibilité des résultats aux configurations expérimentales. Alors, on prend trois axes principaux :

- La force de frappe
- Le type d'embout du marteau
- Le support du marteau lors de la frappe.

Ainsi, on a pris 12 mesures comme précisé dans le tableau C.9 pour chaque harpe, avec 2 répétitions par point. Dans le chapitre suivant, on analysera ces résultats en prenant comme référence la condition de force de frappe inférieure à 15 [N], ce qui est consistant avec les résultats théoriques du chapitre 2 (figure 2.2).

Enfin, on a utilisé un algorithme du lissage pour les FRF (voir fig C.13), codé par Jean-Loïc Le Carrou et inspiré de l'article "Analyse modale expérimentale" par Jean Piranda [11]. Cet algorithme fait une identification des pulsations propres complexes $s_n = -\xi_n\omega_n + j\hat{\omega}_n$ (équation 3.3). Par ailleurs, $\hat{\omega}_n$ est égale à la partie imaginaire de la pulsation propre à $\sqrt{1 - \xi_n^2}$ près [11]. On peut donc en déduire le système suivant :

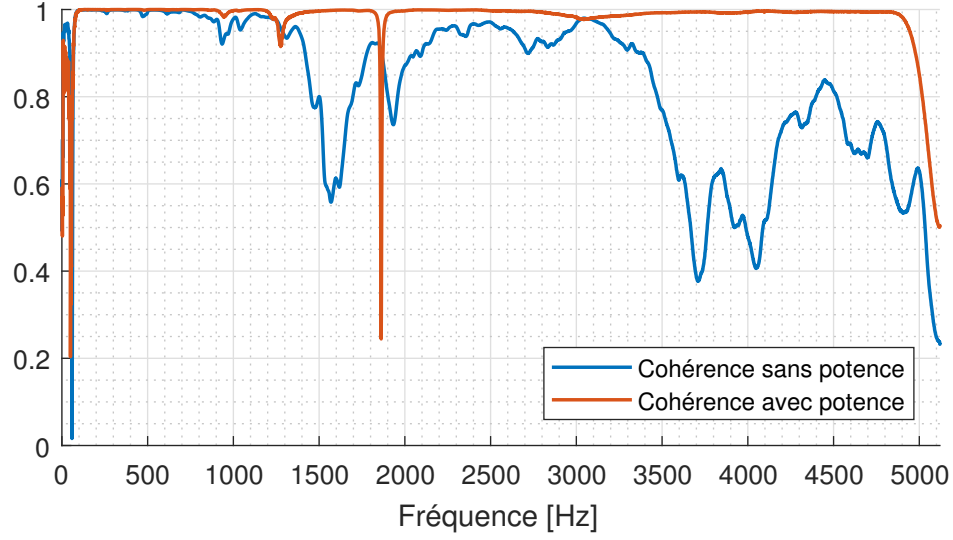


FIGURE 3.3 – Comparaison entre Cohérence moyenne de la harpe Fang sans et avec potence.

$$\begin{cases} \Re(s_n) = -\xi_n \omega_n = \alpha \\ \Im(s_n) = \omega_n \sqrt{1 - \xi_n^2} = \beta \end{cases}$$

Avec α et β les valeurs complexes calculées par l'algorithme de lissage. Alors, on résout le système et pour chaque valeur de s_n on obtient les coefficients d'amortissement ξ_n et les fréquences propres $f_n = \frac{\omega_n}{2\pi}$ comme :

$$\begin{aligned} f_n &= \frac{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{2\pi} \\ \xi_n &= \sqrt{\frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \beta^2}} \end{aligned} \tag{3.15}$$

3.2 Analyse de réponse en fréquence

Le but de cette expérience est d'abord d'évaluer l'existence de différences entre le comportement des harpes avec les ouïes fermées et ouvertes avec des mesures en condition de jeu.

Ensuite, il s'agit de faire une identification modale à partir de l'analyse des premières millisecondes du signal temporel enregistré par l'accéléromètre quand on pince une corde avec le doigt. On a testé cette technique avec l'affichage du spectre et spectrogramme du transitoire.

Cette fois, on obtient des paramètres modaux seulement avec la sortie du système (l'accélération). En effet, ce principe est appliqué par la méthode d'analyse modale opérationnelle (en anglais *Operational modal analysis*, OMA).

Mesures

La procédure de base restant la même, on a placé l'accéléromètre au pied de chaque corde et on l'a déplacé pour chacune des mesures. On a mesuré en pinçant la corde avec le doigt lorsque les ouïes étaient fermées avec du ruban de masquage et puis lorsqu'elles étaient ouvertes.

3.3 Étude de mobilité

La mobilité ou admittance mécanique scalaire est définie comme le rapport entre la vitesse de la structure et la force d'excitation [13]. Elle est une autre façon de représenter le développement de l'équation (3.1) du point de vue des paramètres modaux ; on peut la calculer de manière générale pour un point d'observation A d'une structure excitée au point E à partir de l'équation :

$$Y(A, E, \omega) = j\omega \sum_{k=1}^N \frac{\Phi_k(A)\Phi_k(E)}{m_k(\omega_k^2 + j\eta_k\omega_k\omega - \omega^2)} \quad (3.16)$$

où $\Phi(A)$ et $\Phi(E)$ sont les déformées modales, ω_k la pulsation, m_k la masse modale et $\eta_k = \frac{2\xi_k}{\omega_k}$ le facteur des pertes du mode k .

Quand les points A et E sont confondus au point (x, y) , on peut écrire cette équation sous la forme :

$$Y(x, y, \omega) = j\omega \sum_{k=1}^N \frac{\Phi_k^2(x, y)}{m_k(\omega_k^2 + j\eta_k\omega_k\omega - \omega^2)} \quad (3.17)$$

Courbes de mobilité

On se limite à la mobilité scalaire $Y(\omega)$ en utilisant l'admittance caractéristique et les courbes d'enveloppe de mobilité. Ces courbes de mobilité sont représentées en basses, moyennes et hautes fréquences. Cependant, en hautes fréquences les modes deviennent indiscernables. Pour rendre l'analyse plus simple on applique une technique avec un nombre inférieur de modes impliqués.

Autrement, avec la procédure de mesure avec le marteau d'impact et l'accéléromètre, on est également capable d'obtenir des fonctions de réponse en fréquence (FRF) à partir du rapport entre l'accélération $a(\omega)$ et la force $F(\omega)$ dans le domaine fréquentiel. Ce rapport est appelé *Accélération* $A(\omega)$. Ainsi, pour calculer la mobilité il suffit de dériver par rapport au temps, c'est à dire diviser cette relation par $j\omega$:

$$Y(\omega) = \frac{\text{TF}[a(t)]}{\text{TF}[F(t)]} = \frac{A(\omega)}{j\omega} \quad (3.18)$$

Mobilité moyenne

Cette valeur permet parfois de décrire des tendances pour comparer de manière simple l'acoustique de plusieurs instruments. Pour la calculer on doit définir une bande de fréquences à partir de laquelle il n'est plus possible d'identifier les modes de la structure de manière fiable [13]. Ensuite, on doit obtenir une valeur moyenne de la mobilité jusqu'à la fréquence f_c du coupure du marteau d'impact, que pour notre cas était de 10 [kHz].

Mesures

À la différence des mesures faites pour l'analyse modale, on a fait des mesures colocalisées au pied de chaque corde. Avec ces mesures on a pu calculer la mobilité moyenne de chaque corde par harpe et en plus on a tracé des cartes d'admittance dans lesquelles on superpose les fréquences modales et les fréquences de l'accordage des cordes lors de l'expérience. On voit apparaître des coïncidences qui seront analysées dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

Résultats

Dans cette partie, on montre les résultats obtenus pour chaque approche présentée dans le chapitre précédent et puis on fait une interprétation des mêmes en les comparant avec la théorie. Cette partie a comme but de regrouper toutes les informations acquises sur le comportement vibratoire dans le contexte des descripteurs acoustiques et leur finalité.

Comme auparavant, on traite d'abord l'analyse modale, puis les mesures en condition de jeu et enfin les mesures de mobilité.

4.1 Analyse modale expérimental

Après avoir appliqué la méthode LSCF sur le logiciel MODAN et à l'aide de plusieurs séries de données mesurées, on a tenté l'identification des modes les plus importants pour les trois harpes pour chaque série de mesures. Alors, pour l'analyse des données on a pris une plage de fréquences allant de 150 Hz jusqu'à 2000 Hz . Ici, l'algorithme d'identification montrait des pôles stables sur des pics très proches mais avec un facteur MPC (*Modal Phase Collinearity*) trop éloigné de l'unité. De plus, la représentation de Nyquist confirme bien la complexité de certains modes. Ce résultat est dû souvent au bruit [14], aux erreurs de mesure ou le fait que l'hypothèse d'amortissements proportionnels (hypothèse de Basile) ne soit pas vérifiée. Alors, ces fréquences ne contribuent pas à la base modale. Ce problème est arrivé surtout pour la harpe Massango et d'ailleurs c'est pour cela qu'on a fait plus de mesures pour cet instrument.

Ultérieurement, on a extrait des bases modales pour les trois harpes ; les résultats les plus adaptés sont montrés sur les tableaux C.2, C.3 et C.4.

Harpe Fang

La harpe Fang a un premier mode très amorti par rapport aux autres harpes avec la fréquence fondamentale la plus basse de 166 Hz . La méthode d'identification avec MODAN a fonctionné de manière consistante avec toutes les techniques utilisées. Néanmoins, on n'a pas pu identifier (avec un facteur MPC acceptable) des modes au dessus de 500 Hz .

Harpe Tsogho

L'identification sur la harpe Tsogho calcule sa fréquence fondamentale à environ 400 Hz et on a pu identifier des modes en dessous de 900 Hz pour tous les essais mais pour la comparaison on utilisera ceux obtenus avec la première technique de mesure. Pour cette harpe, il semble que la présence des poils et d'irrégularités sur la table d'harmonie a joué un rôle sur la fidélité des résultats.

Harpe Massango

Pour la harpe Massango on a obtenu, de manière consistante pour toutes les mesures effectuées, la même fréquence pour la fondamentale (vers 300 Hz) et certains autres modes. Cependant, la précision de l'identification (paramètre MPC) n'est pas aussi élevée que celle des autres harpes et les modes restent complexes et difficiles à interpréter. Cela pourrait être à cause de la texture peu uniforme de la table d'harmonie. Cependant, on a été capable d'effectuer une identification jusqu'à 930 Hz , la fréquence la plus aiguë pour les trois harpes.

4.1.1 Déformées modales

On peut regarder sur le tableau (C.5) toutes les déformées modales obtenues pour les trois harpes. En contraste avec des structures comme la membrane d'un tambour, dont les lignes nodales et ventres sont symétriques par rapport aux axes, les déformées des harpes du Gabon n'ont de motifs symétriques que pour certains modes. Par exemple, le mode 4 (tableau C.5) de la harpe Fang présente la moitié inférieure de la table d'harmonie comme une déformée de membrane rectangulaire (1,1) alors que sa moitié supérieure ressemble à une déformée (2,1) du même type.

Alors, la classification classique des déformées modales a été réduite à cause du manque d'uniformité des harpes et des problèmes avec l'identification en MODAN. On présente dans le tableau (4.1) les déformées qui étaient plus régulières.

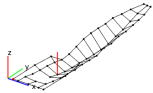
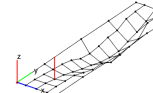
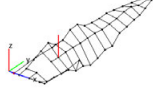
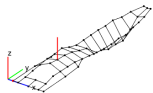
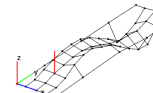
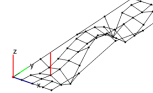
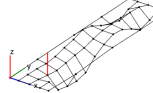
m \ n	1			2
1	 a) 166,5 Hz	 b) 401,7 Hz	 c) 299,56 Hz	 a) 474,69 Hz
2	 a) 361,42 Hz	 b) 415,07 Hz	 c) 389,23 Hz	
3		 c) 568,94 Hz		 c) 505,23 Hz

TABLE 4.1 – Certaines déformées modales des harpes du Gabon
a) Harpe Fang b) Harpe Tsogho c) Harpe Massango

De toutes manières, toutes les déformées nous donnent quand même des informations importantes pour comprendre quelles fréquences du rayonnement seront défavorisées (proches des nœuds) ou privilégiées (proches des anti-nœuds).

4.1.2 Rapport des fréquences

On a calculé le rapport des fréquences modales identifiées avec le but de les comparer aux quotients des fréquences théoriques du chapitre 2. On peut voir les résultats dans les tableaux (C.6, C.7 et C.8). Alors, si l'on compare les valeurs calculées pour une membrane idéale, comme celles du tableau (2.1) aux rapports expérimentaux on peut voir des coïncidences mais il n'y a pas une correspondance directe avec les déformées modales respectives. Cela pourrait être du à l'irrégularité des tables d'harmonie qui n'était pas prise en compte pour la modélisation théorique de la membrane dans le chapitre 2. En pratique, la tension sur la surface et la masse volumique pourraient ne pas être uniformes ou bien la table d'harmonie pourrait être mieux représentée par plusieurs membranes couplées. Donc, pour conclure définitivement sur ce choix, il faudrait d'abord améliorer l'étude organologique, simuler une nouvelle géométrie et ses propriétés, puis utiliser une méthode numérique pour la modélisation, ce qui n'est pas l'objectif principal de ce document.

4.1.3 Variation de fréquence

D'après les résultats obtenus avec l'analyse modale, on a trouvé que les conditions de mesure pouvaient modifier les matrices de FRF comme on peut voir sur la figure (C.7), surtout pour la harpe Massango. Du fait que parfois les valeurs de pics ne correspondent pas aux fréquences propres, on va analyser ce phénomène plus en détail dans le paragraphe suivant.

Après avoir tracé la variation en pourcentage des fréquences Δ_f et d'amortissement Δ_{ξ} par rapport à la condition de référence (force < 15 [N]), nous pouvons constater qu'effectivement les fréquences modales identifiées varient en fonction de la condition de mesure, surtout par rapport à la force appliquée pour frapper les tables d'harmonie. Pour toutes les harpes il y a eu des modes pour lesquels la variation la moins importante était pour une force inférieure à 15 N. Les variations d'amortissement, autour de 50% pour la plupart des cas, dénotent un problème d'identification pour ces coefficients et donc des valeurs peu fiables.

Plus spécifiquement, pour la harpe Fang les fréquences et amortissements identifiés sont assez stables (autour de 3%), voir figure (4.1), sauf pour le cas des modes 5 et 8. Pour la harpe Tsogho, le mode 4 présente plus de variations par rapport aux autres (autour de 4%) dans toutes les conditions. Néanmoins, pour la harpe Massango, il y a des variations en fréquence de plus de 5%, ce qui indique une forte dépendance entre les conditions de mesure et les fréquences identifiées. La condition avec la moindre force serait donc la plus éloignée des autres. On peut regarder toutes les figures correspondantes dans l'annexe C (C.16 jusqu'à C.26). Tout cela met en doute la technique d'excitation avec le marteau d'impact pour ce type d'instrument, car il serait assez difficile d'appliquer régulièrement la même force pour chaque point lors de l'expérience sur site, dans une période de temps raisonnable.

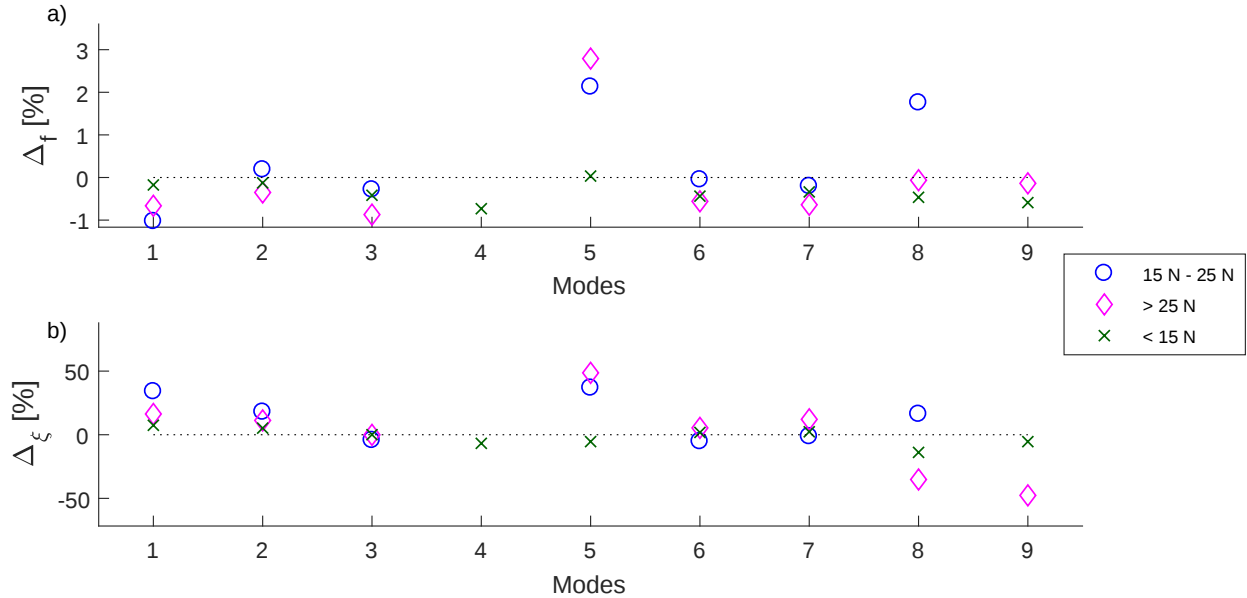


FIGURE 4.1 – Harpe Fang : Embout en vinyle et technique avec potence
a) Variation de fréquence b) Variation d'amortissement

4.2 Analyse de réponse en fréquence

D'abord, on constate que l'effet de fermer les événements des harpes ne fait pas une différence importante sur le signal obtenu. On peut voir par exemple la figure (4.2) du spectrogramme pour les deux cas, avec une différence très peu remarquable, sauf pour le fait que l'amplitude décroisse un peu plus rapidement pour les événements ouverts.

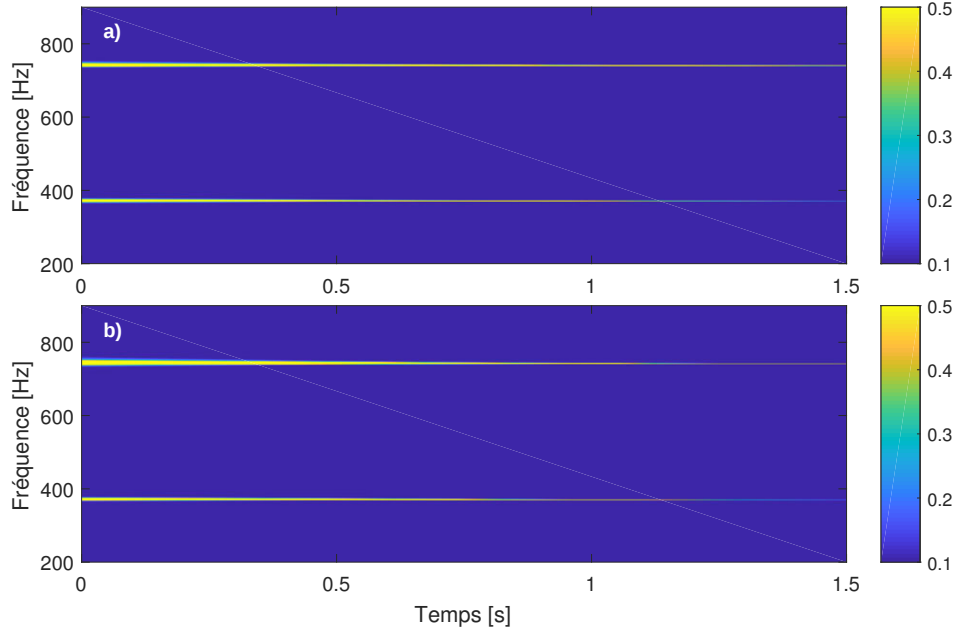


FIGURE 4.2 – Harpe Fang : Spectrogramme de la corde 1
a) Événements ouverts b) Événements fermés

4.2.1 Spectrogramme et spectre du transitoire

On a utilisé la TFR (*Time-Frequency Toolbox* [15]) pour analyser le spectrogramme d'environ 600 ms des signaux d'accélération. En plus, on a tracé le spectre des transitoires respectives pour comparer les résultats. Les figures (C.27 jusqu'à C.29) montrent les fréquences modales identifiées avec la TFR pour chaque harpe, de manière similaire, les figures (C.30 jusqu'à C.32) montrent l'application du spectre.

On voit qu'avec ces deux techniques on ne peut identifier qu'un nombre limité de fréquences modales, avec moins de certitude qu'en utilisant les méthodes LSCF et lissage de fonctions de transfert. En tout cas, cela a été un exercice intéressant pour prouver que l'information des fréquences modales d'une structure est présente dans les signaux temporels que l'on acquiert seulement avec l'accéléromètre.

4.3 Comparaison LSCF-Lissage

Maintenant, on s'intéresse à comparer l'identification effectuée avec la méthode LSCF et la condition de référence du lissage de fonctions de transfert, placées par ordre croissant sur le tableau (4.2). On voit qu'il y a des modes qui coïncident pour toutes les harpes comme attendu, cependant, il y a des fréquences qui ne sont pas présentes sur l'identification de la méthode LSCF et vice-versa. On peut attribuer cette anomalie au fait que l'on a utilisé seulement une FRF pour appliquer la méthode de lissage alors que pour l'analyse sur MODAN on avait un nombre supérieur de courbes. En plus, on a déjà vu que les fréquences identifiées varient en fonction de la condition de mesure et donc la sélection des pôles stables de la méthode LSCF n'a pas fonctionné uniformément au-dessus de 500 Hz.

	Harpe Fang		Harpe Tsogho		Harpe Massango	
MODE	LSCF	Lissage	LSCF	Lissage	LSCF	Lissage
1	166,5	166,71	401,7	399,05	299,56	303,68
2	231,88	232,82	415,07		389,23	376,39
3	361,42	361,72		437,18		459,19
4	366,2		467,32		505,23	529,59
5	378,5		537,36		568,94	
6	474,69	473,88		564,86		622,29
7	482,75		598,14		691,84	716,84
8		500,78		761,18		724,48
9		660,71		858,48		818,03
10		663,89	899,37			877,20
11		762,05			932,65	943,60
12		858,95				

TABLE 4.2 – Fréquences modales identifiées avec LSCF et Lissage

Chapitre 5

Descripteur vibratoire

Après avoir mesuré la mobilité pour les 8 cordes de chaque harpe, on peut en profiter pour analyser trois points de vue différents. On commence par afficher les cartes de mobilité, puis une comparaison d'une mobilité moyenne des trois harpes et enfin la variation de la mobilité par corde.

5.1 Cartes de mobilité

Les cartes de mobilité représentent la mobilité superposée en fonction de la fréquence et du numéro de la corde (figures 5.1, C.33 et C.34). On peut voir alors la fréquence fondamentale de chaque corde (cercle plein rouge) et les fréquences de 6 harmoniques (cercles blancs) pour signaler l'existence de couplage.

Pour la harpe Fang, on constate un couplage pour les cordes 2, 4 et 7. Pour la harpe Tsogho on n'a pas de couplage apparent pour les fondamentales mais pour les partiels supérieurs. Enfin, pour la harpe Massango, on voit bien un couplage pour les cordes 1 et 2 mais aussi quelques partiels de fréquences moyennes. Alors, on peut conclure que pour les cordes où il existe un couplage, ses vibrations dureront peu de temps mais l'amplitude du rayonnement acoustique pour ces notes sera plus importante.

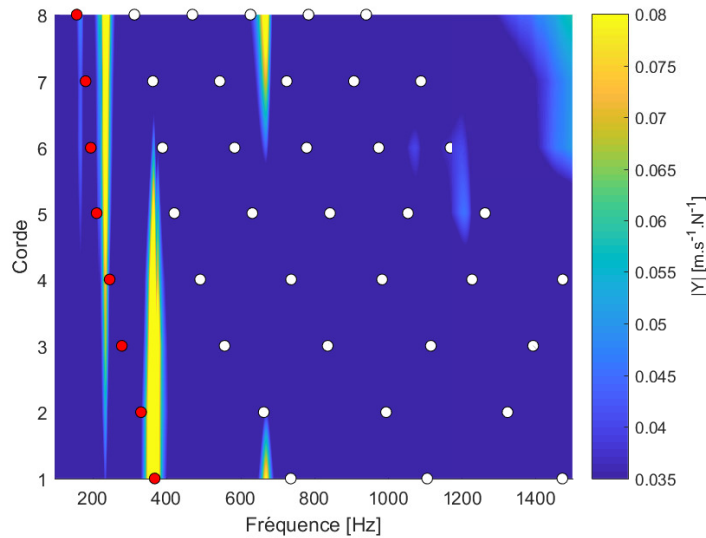


FIGURE 5.1 – Carte de mobilité pour la Harpe Fang

5.2 Mobilité moyenne

La figure (5.2) nous permet de remarquer comment la mobilité des harpes évolue en fonction des moyennes fréquences, la mobilité arrive à une valeur quasi constante. La superposition des traits pleins des mobilités montrent déjà une différence pour les trois harpes mais ce n'est qu'avec le calcul de la mobilité moyenne (traits pointillés), que l'on constate très facilement quelle harpe est plus mobile pour un cas particulier.

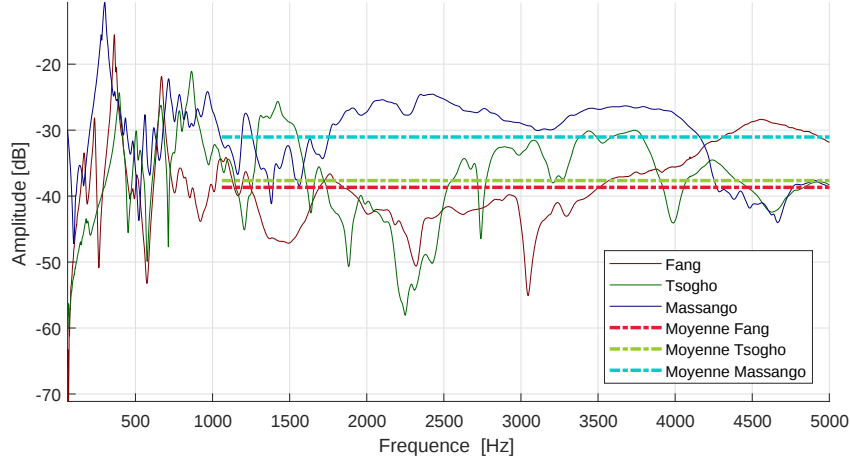


FIGURE 5.2 – Exemple de comparaison des mobilités moyennes pour la corde 1

5.3 Variation de Mobilité moyenne

Quand on trace la mobilité moyenne des trois harpes comme dans la section précédente, on n'a une information que d'une corde à chaque fois. Il est donc pertinent d'illustrer la variation de la mobilité moyenne des harpes en fonction de la corde mesurée pour avoir l'ensemble des cas et pouvoir conclure sur ce sujet.

La figure (5.3) donne le contexte de la situation pour les huit cordes des trois harpes et compare sa mobilité. Il est intéressant de signaler qu'il y a peu de variation des mobilités pour les trois harpes sauf pour le cas de la harpe Fang sur les cordes 6 et 8. La harpe Massango apparaît comme la plus stable des trois, suivie par la harpe Tsogho.

Si on trie maintenant les harpes par sa mobilité, la harpe Massango est toujours plus mobile que la harpe Tsogho (sauf pour la corde 5). Par contre, la harpe Fang est la moins mobile des trois pour les trois premières cordes mais devient la plus mobile pour les 5 cordes restantes.

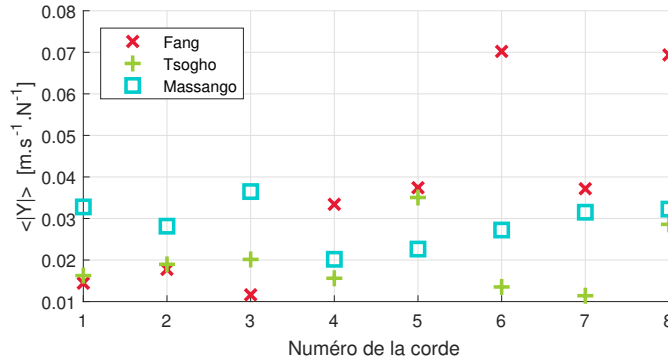


FIGURE 5.3 – Variation de la valeur de mobilité moyenne selon les cordes des harpes

Chapitre 6

Conclusions et perspectives

6.1 Conclusions

La suite de cette étude sur l’acoustique des harpes du Gabon a été une expérience que d’une part permet de comprendre mieux leur comportement vibratoire, et d’autre part pose des questions intéressantes sur leur histoire et contribution culturelle.

Depuis le début, les techniques de facture instrumentale et les matériaux utilisés annoncent le caractère artisanal de ces instruments de musique. Ceci crée des non-linéarités dans le système à cause desquelles il faudra vérifier les approximations faites et valider les méthodes, notamment pour l’analyse modale expérimentale.

La présence des variations des fréquences modales et d’amortissement selon les conditions de mesure est un facteur très important à considérer pour la suite de ce stage. Il est possible que la technique de mesure du marteau d’impact ne soit pas applicable dans tous les cas, c’est à dire pour toutes les harpes ; elle ne serait donc pas adaptée pour aucune d’entre elles.

Parmi les trois harpes étudiées, la harpe Fang a été la plus consistante et similaire à un instrument occidental. On peut attribuer ce fait à sa table d’harmonie qui était peinte et assez régulière. Au contraire, la harpe Tsogho avait beaucoup d’irrégularités sur la peau de la table d’harmonie et donc l’étude de son comportement vibratoire a été plus complexe. Enfin, à cause de la texture et irrégularités de la table d’harmonie, en plus de la condition des chevilles, la harpe Massango a été l’instrument le moins fiable des instruments.

Il y a eu plusieurs problèmes dès les premières mesures et on a été obligé de recommencer et d’effectuer plusieurs fois la même procédure pour être sûr de leur qualité. De ce fait on remarque fortement l’importance d’une procédure expérimentale effective et claire.

Les descripteurs acoustiques comme la mobilité moyenne sont un outil très puissant pour cataloguer un instrument comme ceux de collection ou personnels, puisque son obtention n’est pas destructive et il s’agit d’une valeur scalaire réelle, qu’on peut tabuler de manière facile pour comparer entre plusieurs exemplaires du même type.

On espère que ce travail soit une brique qui contribuera au ‘Projet Kundi’ et aux chercheurs passionnés par la connaissance et le partage avec le monde la richesse de la culture des ethnies du Gabon.

6.2 Perspectives

Il serait très favorable de continuer cette étude en appliquant des méthodes d’identification très répandues comme la méthode ESPRIT ou AMOP. On pourrait donc calculer un facteur de recouvrement modal μ , en anglais *Modal Overlap Factor* (MOF) pour quantifier les domaines fréquentiels de manière plus précise (plage des moyennes fréquences $30\% < \mu < 100\%$).

D’un point de vue pratique, pour l’étude de n’importe quel type de harpe, on peut décrire son comportement mécanique à l’aide d’un modèle simplifié. L’élaboration complète de ce modèle serait une contribution clé pour ce projet. Donc, dans une première étape, on pourrait analyser séparément les cordes et la table d’harmonie pour se focaliser sur ses caractéristiques acoustiques isolées.

Dans les modèles standards, on s’intéresse d’abord à la géométrie et paramètres mécaniques classiques des

matériaux tels que le module de Young E , le coefficient de Poisson ν et la masse volumique ρ . Pour le cas des harpes du Gabon, l'estimation expérimentale de la géométrie réelle n'est pas possible sans des instruments de mesure spécialisés, notamment un scanner 3D ou un mesureur d'épaisseur laser, qu'il faudrait implémenter. Par ailleurs, les techniques destinées à estimer les paramètres élastiques comme par exemple la masse volumique des cordes ρ , nécessitent des échantillons supplémentaires (qu'il faudrait procurer) pour les peser. La suite de cette recherche pourrait être enrichie par l'utilisation de ces outils.

Dans une deuxième étape du modèle, on pourrait analyser généralement le couplage entre cordes et table d'harmonie. Il est important de noter l'existence de phénomènes de vibration par sympathie et de l'interaction non linéaires entre caisse de résonance et table d'harmonie et entre corde-corde via la table d'harmonie [8].

Finalement, il y a d'autres questions intéressantes qui peuvent être abordées comme une suite logique à ce sujet de stage. Par exemple :

Est-ce qu'on peut caractériser ces harpes par son rayonnement acoustique ? Pour cela, on pourrait se concentrer sur le rayonnement acoustique des harpes en prenant en compte la relation entre le point où la corde est fixée et les déformées modales de la table d'harmonie. D'ailleurs, plusieurs études ont démontré que le rayonnement est principalement contrôlé par les déformées modales et les fréquences propres de la harpe [16][8]. On pourrait tirer des informations utiles du rayonnement en mesurant les patrons de directivité, la puissance et le rendement acoustique et en utilisant des sources virtuelles modélisées [17].

Annexe A

Photographies complémentaires

A.1 Caractéristiques physiques

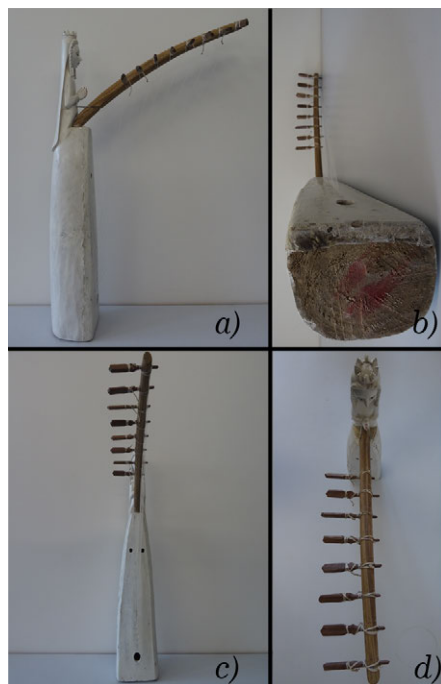


FIGURE A.1 – Vues Harpe Fang. a) Latérale b) Inférieure c) Frontale d) Supérieure

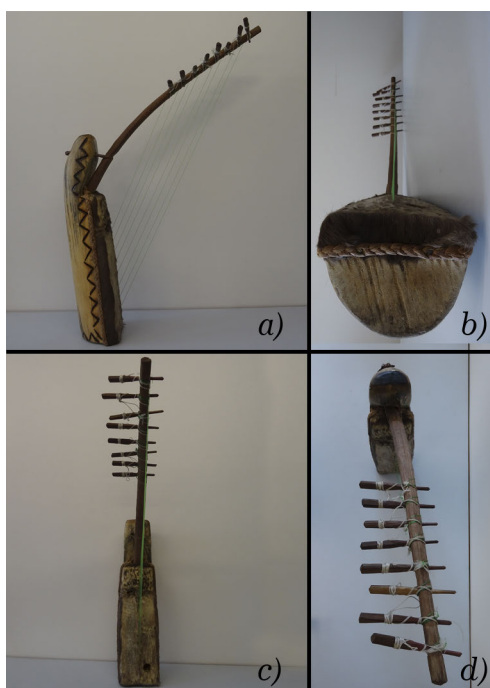


FIGURE A.2 – Vues Harpe Tsogho. a) Latérale b) Inférieure c) Frontale d) Supérieure

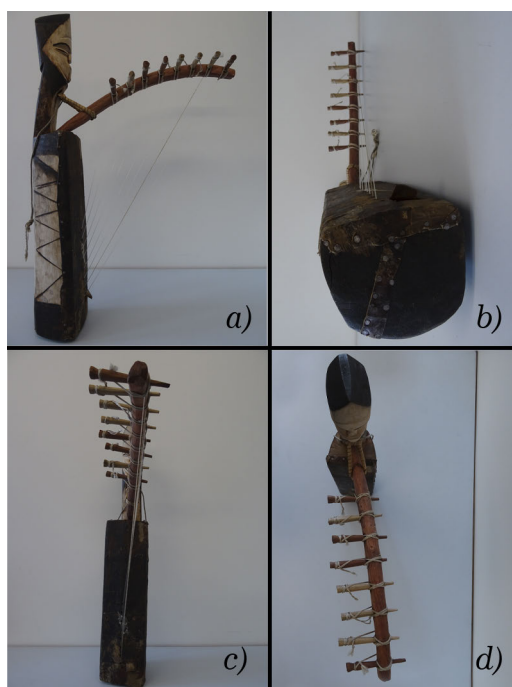


FIGURE A.3 – Vues Harpe Massango. a) Latérale b) Inférieure c) Frontale d) Supérieure

A.2 Facture instrumentale



FIGURE A.4 – Ciselage du corps de la harpe



FIGURE A.5 – Harpe Fang. Étapes d'élaboration de sculpture

Annexe B

Paramètres de la harpe

B.1 Paramètres organologiques

	Harpe Fang		Harpe Tsogho		Harpe Massango	
Corde	l [cm]	$\angle$	l [cm]	$\angle$	l [cm]	$\angle$
1	37,5	13 °	43,5	31 °	28,5	16 °
2	41,5	16 °	50,5	32 °	33,5	22 °
3	47	18 °	57	32 °	38	24 °
4	51	20 °	62,5	31 °	42,5	27 °
5	55,5	22 °	70	30 °	47	29 °
6	60,5	24 °	77	30 °	51	30 °
7	65	26 °	84	30 °	55	31 °
8	69,5	26 °	90	31 °	58,5	33 °
ϕ [mm]	0,83		0,95		0,85	

TABLE B.1 – Longueur vibrante l , angle $\angle$ et diamètre ϕ des cordes

	Fang	Tsogho	Massango
Table d'harmonie			
Forme	Trapézoïdale	Trapézoïdale	Rectangulaire
L [cm]	50	41	40
lh [cm]	3	11	10
lb [cm]	11	12.5	10
h [mm]	≈ 1	0.94	1.08
S [m ²]	0,035	0,047	0,04

TABLE B.2 – Caractéristiques des tables d'harmonie

	Fang	Tsogho	Massango
Oùes de la table d'harmonie			
Géométrie	Elliptique et circulaires	Circulaire	Rectangulaire
Grandeurs [mm]	$\phi_{F1} = 12,4$ $\phi_{F2} = 13$ $a_F = 14,35$; $b_F = 10,55$	$\phi_T = 30$	$a_M = 25$; $b_M = 20$
Surface [m ²]	$S_{F1} = 1,21 \times 10^{-4}$ $S_{F2} = 1,33 \times 10^{-4}$ $S_{F3} = 9,51 \times 10^{-4}$	$S_T = 7,07 \times 10^{-4}$	$S_M = 5 \times 10^{-4}$

TABLE B.3 – Caractéristiques des oùes

	Fang	Tsogho	Massango
L_T [cm]	71,3	60,5	67
$\angle_t$	5°	8°	5°
m [g]	1091	1862	1466

TABLE B.4 – Caractéristiques du corps des harpes

B.2 Accordage des harpes

Harpe Fang				
Corde	Fréquence [Hz]	Fréquence tempérée [Hz]	Note	Cents
1	363,98	369,99	F#4	28,4
2	322,86	329,63	E3	35,9
3	274,86	277,18	C#4	14,6
4	247,12	246,94	B3	-1,3
5	214,32	220	A3	45,3
6	196,72	196	G3	-6,3
7	181,62	185	F#3	31,9
8	161,23	164,81	E3	38

TABLE B.5 – Accordage d'origine - Harpe Fang

Harpe Tsogho				
Corde	Fréquence [Hz]	Fréquence tempérée [Hz]	Note	Cents
1	246,43	246,94	B3	3,6
2	219,23	220	A3	6,1
3	183,6	185	F#3	13,2
4	163,74	164,81	E3	11,3
5	144,91	146,83	D3	22,8
6	129,01	130,81	C3	24
7	122,42	123,47	B2	14,8
8	110,07	110	A2	-1,1

TABLE B.6 – Accordage d'origine - Harpe Tsogho

Harpe Massango				
Corde	Fréquence [Hz]	Fréquence tempérée [Hz]	Note	Cents
1	317,87	311,13	E♭4	-37,1
2	287,4	293,66	D4	37,3
3	248,38	246,94	B3	-10,1
4	216,4	220	A3	28,6
5	192,12	196	G3	34,6
6	180,69	174,61	F3	-59,3
7	159,08	155,56	E♭3	-38,7
8	142,53	146,83	D3	51,5

TABLE B.7 – Accordage d’origine - Harpe Massango

Fréquences [Hz]			
Corde	Fang	Tsogho	Massango
1	368,2	244,3	306,8
2	331,3	206,5	290,1
3	278,7	182,6	229,7
4	245,7	156,8	199,5
5	210,6	146,6	167,1
6	194,7	128,6	147,3
7	181,3	118,6	113,2
8	156,7	109,2	93,8

TABLE B.8 – Accordage mesuré pour l’étude de mobilité

Annexe C

Étude expérimentale

C.1 Ressources

Nom de la ressource	Quantité
Harpe Fang	1
Harpe Tsogho	1
Harpe Massango	1
Marteau d'impact PCB 086E80 (embout en acier) - sensibilité 23,61 mV/N	1
Marteau d'impact PCB 086E80 (embout en vinyle) - sensibilité 20,69 mV/N	1
Accéléromètre PCB 352A21 - sensibilité 1,058 $mV/(m/s^2)$	1
Carte d'acquisition NI USB-9162	1
Conditionneur PCB 482C05	1
Ordinateur avec Matlab et MODAN	1
Potence	2
Mètre	1
Mètre ruban	1
Ruban de masquage	1
Morceau de feutre	1

TABLE C.1 – Ressources utilisées pour l'étude expérimentale

C.2 Résultats analyse modale

Harpe Fang			
Mode	Fréquence [Hz]	Amortissement	MPC
1	166,5	5,7	96,3
2	231,88	1,2	95,5
3	361,42	2,6	87,8
4	366,2	1,1	34
5	378,5	1,7	86,8
6	474,69	0,94	38,8
7	482,75	0,65	60,6

TABLE C.2 – Fréquences modales MODAN. Harpe Fang

Harpe Tsogho			
Mode	Fréquence [Hz]	Amortissement	MPC
1	401,7	1,6	90,4
2	415,07	2,8	81,7
3	467,32	1,7	92,9
4	537,36	1,9	56,4
5	598,14	0,64	44,2
6	899,37	1,1	40,9

TABLE C.3 – Fréquences modales MODAN. Harpe Tsogho

Harpe Massango			
Mode	Fréquence [Hz]	Amortissement	MPC
1	299,56	2,6	69,7
2	389,23	1,7	80,3
3	505,23	2,2	53,5
4	568,94	1,3	19
5	691,84	1,1	42,9
6	932,65	1,2	12,1

TABLE C.4 – Fréquences modales MODAN. Harpe Massango

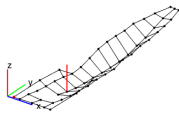
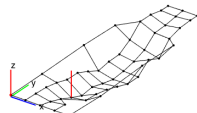
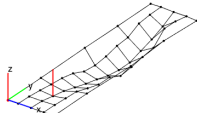
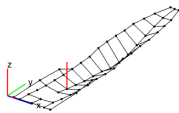
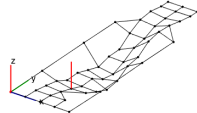
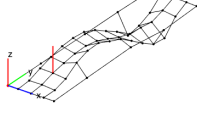
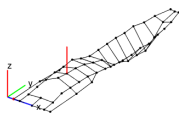
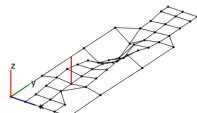
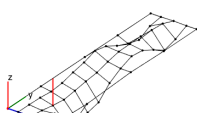
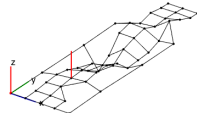
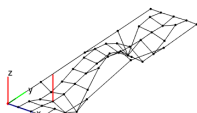
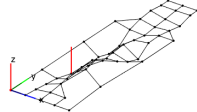
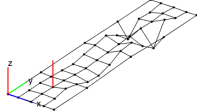
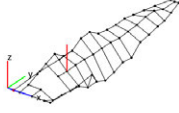
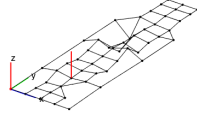
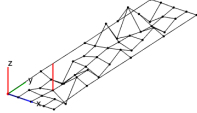
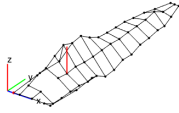
Harpe Mode	Fang	Tsogho	Massango
1	 166,5 Hz	 401,7 Hz	 299,6 Hz
2	 231,9 Hz	 415,1 Hz	 389,2 Hz
3	 361,4 Hz	 467,3 Hz	 505,2 Hz
4	 366,2 Hz	 537,4 Hz	 568,9 Hz
5	 378,5 Hz	 598,1 Hz	 691,8 Hz
6	 474,7 Hz	 899,4 Hz	 932,7 Hz
7	 482,8 Hz		

TABLE C.5 – Déformées modales des harpes du Gabon

C.3 Rapport des fréquences

Harpe Fang		
Mode	Fréquence [Hz]	Rapport
1	166,5	1
2	231,88	1,39
3	361,42	2,17
4	366,2	2,2
5	378,5	2,27
6	474,69	2,85
7	482,75	2,9

TABLE C.6 – Rapport des fréquences Harpe Fang

Harpe Tsogho		
Mode	Fréquence [Hz]	Rapport
1	401,7	1
2	415,07	1,03
3	467,32	1,16
4	537,36	1,34
5	598,14	1,49
6	899,37	2,24

TABLE C.7 – Rapport des fréquences Harpe Tsogho

Harpe Massango		
Mode	Fréquence [Hz]	Rapport
1	299,56	1
2	389,23	1,3
3	505,23	1,69
4	568,94	1,9
5	691,84	2,31
6	932,65	3,11

TABLE C.8 – Rapport des fréquences Harpe Massango

C.4 Protocole expérimental

C.4.1 Maillage des harpes

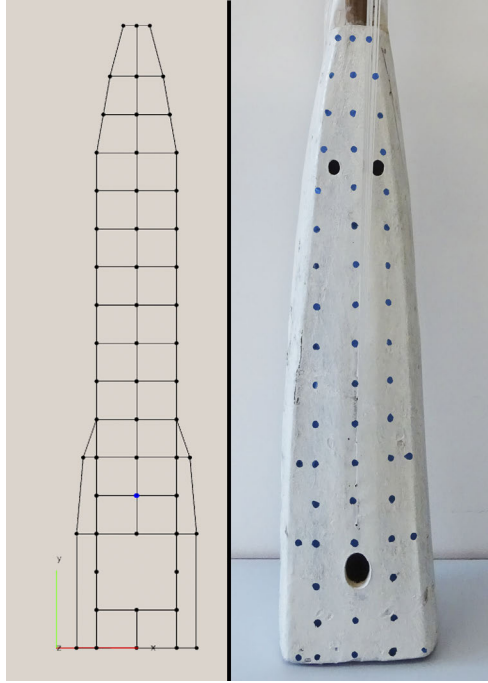


FIGURE C.1 – Maillage Harpe Fang

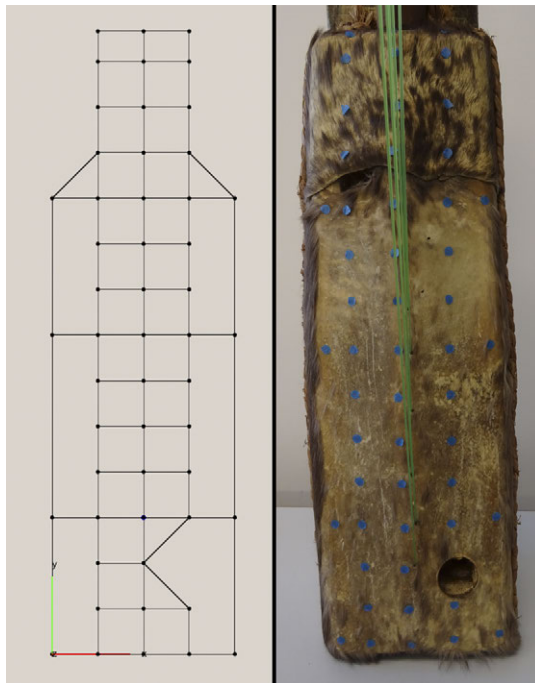


FIGURE C.2 – Maillage Harpe Tsogho

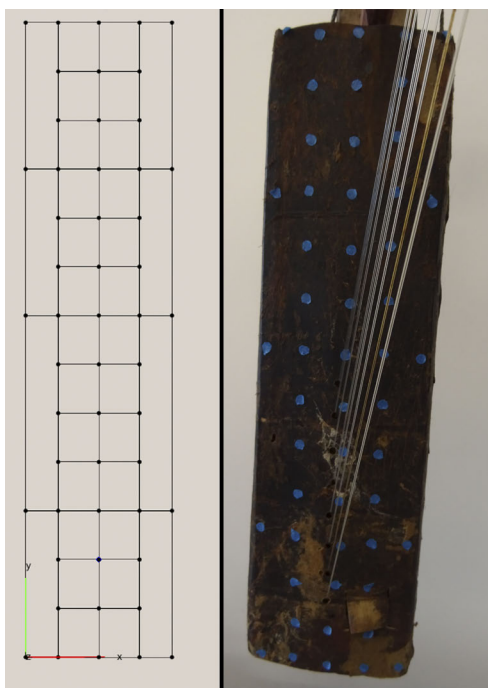


FIGURE C.3 – Maillage Harpe Massango

C.4.2 Montage

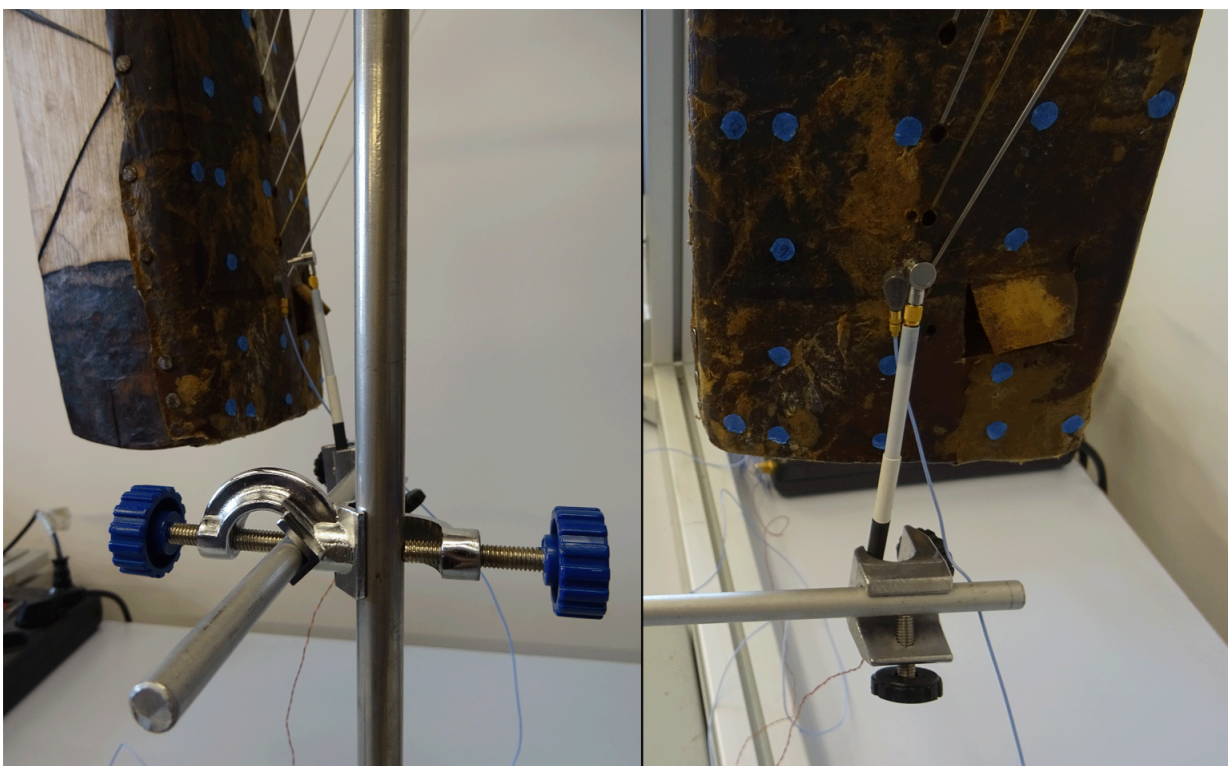


FIGURE C.4 – Technique de mesure avec potence. Montage Harpe Massango

C.4.3 Diagrammes de stabilité

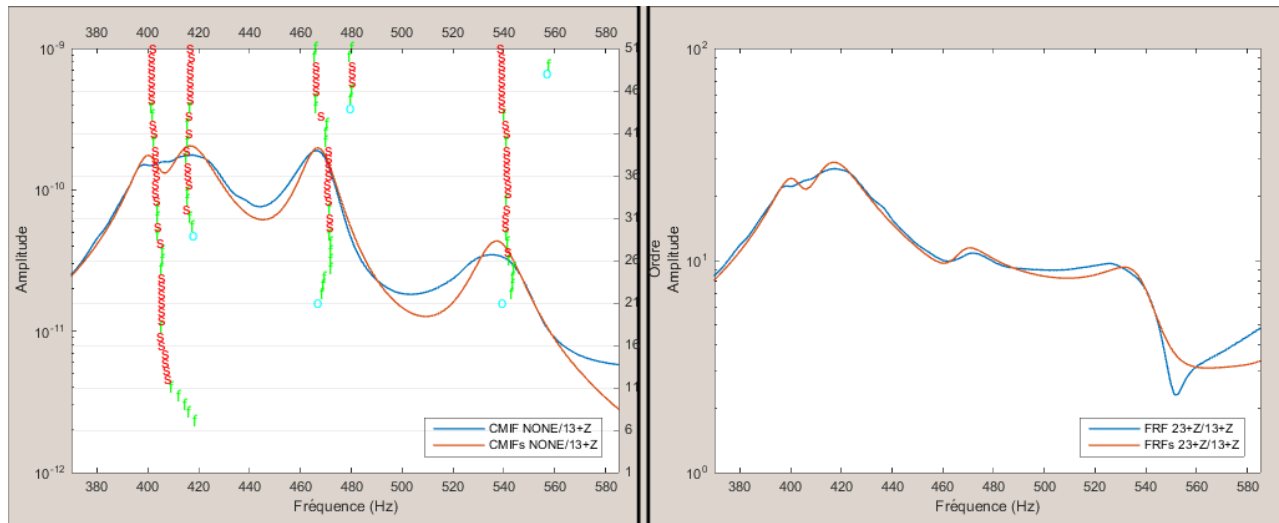


FIGURE C.5 – Harpe Tsogho. a) Diagramme de stabilité b) FRF mesurée en bleu, FRF synthétisée en rouge

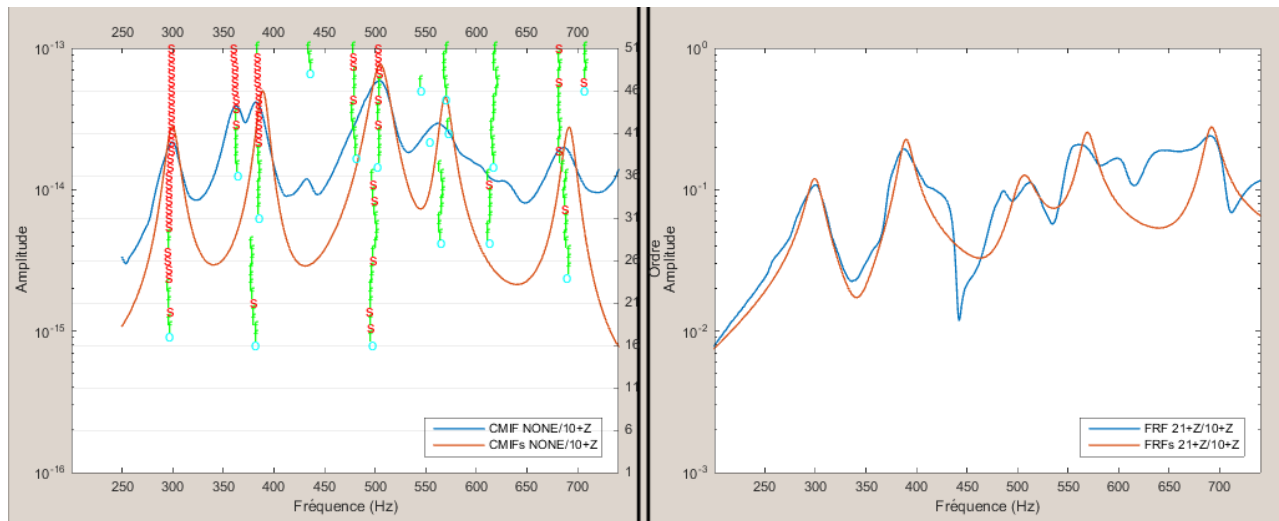


FIGURE C.6 – Harpe Massango. a) Diagramme de stabilité b) FRF mesurée en bleu, FRF synthétisée en rouge

C.5 Comparaison entre techniques de mesure

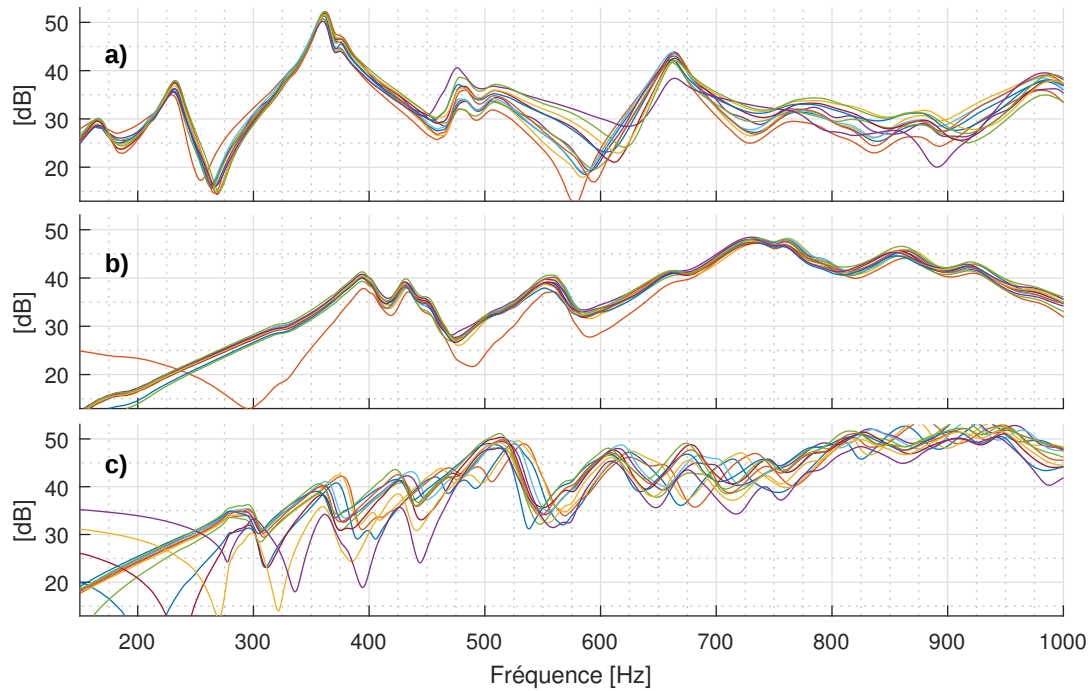


FIGURE C.7 – Comparaison des FRF par condition de mesure
a) Harpe Fang b) Harpe Tsogho c) Harpe Massango

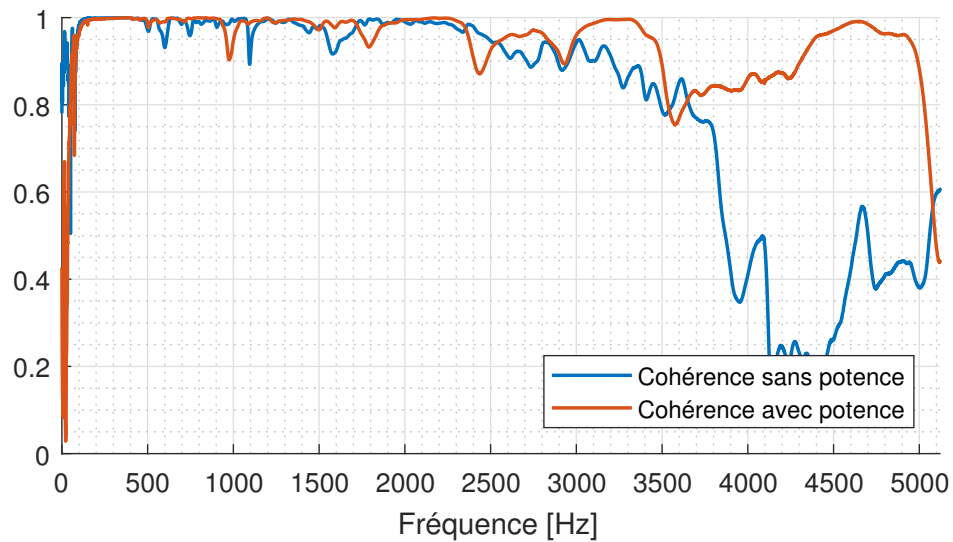


FIGURE C.8 – Comparaison entre Cohérence moyenne de la harpe Tsogho sans et avec potence.

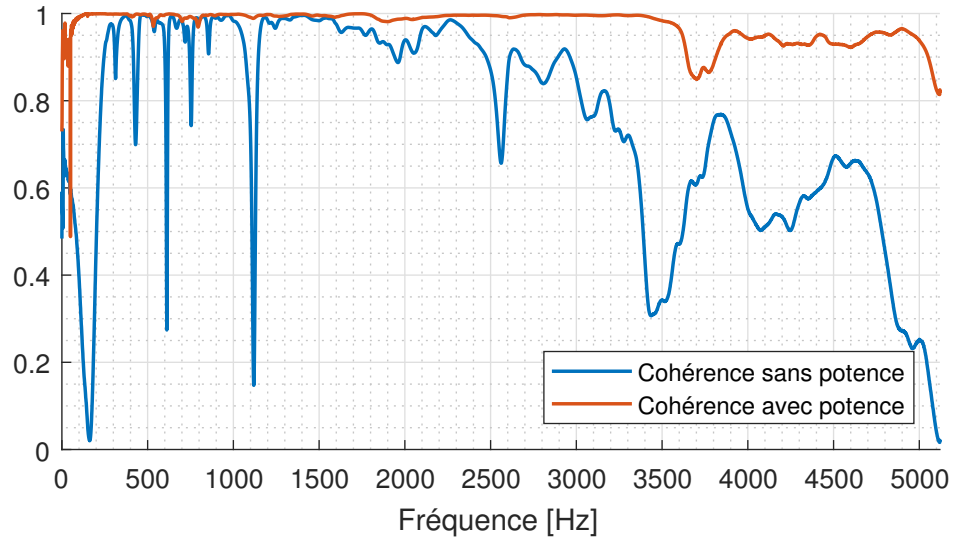


FIGURE C.9 – Comparaison entre Cohérence moyenne de la harpe Massango sans et avec potence.

C.6 Comparaison des conditions de mesure

Harpe		Fang	Tsogho	Massango
Température [° C]		24	25	25
Humidité [%]		63	64	62
Configuration du marteau d'impact				
Mesure	Type d'embout	Sensibilité [mV/N]	Technique	Force [N]
1	Acier	23,61	Potence	15-25
2	Acier	23,61	Potence	≥ 25
3	Acier	23,61	Potence	≤ 15
4	Vinyle	20,69	Potence	15-25
5	Vinyle	20,69	Potence	≥ 25
6	Vinyle	20,69	Potence	≤ 15
7	Acier	23,61	Main	15-25
8	Acier	23,61	Main	≥ 25
9	Acier	23,61	Main	≤ 15
10	Vinyle	20,69	Main	15-25
11	Vinyle	20,69	Main	≥ 25
12	Vinyle	20,69	Main	≤ 15

TABLE C.9 – Conditions de mesure pour le test comparatif

C.7 Résultats de l'identification modale par lissage

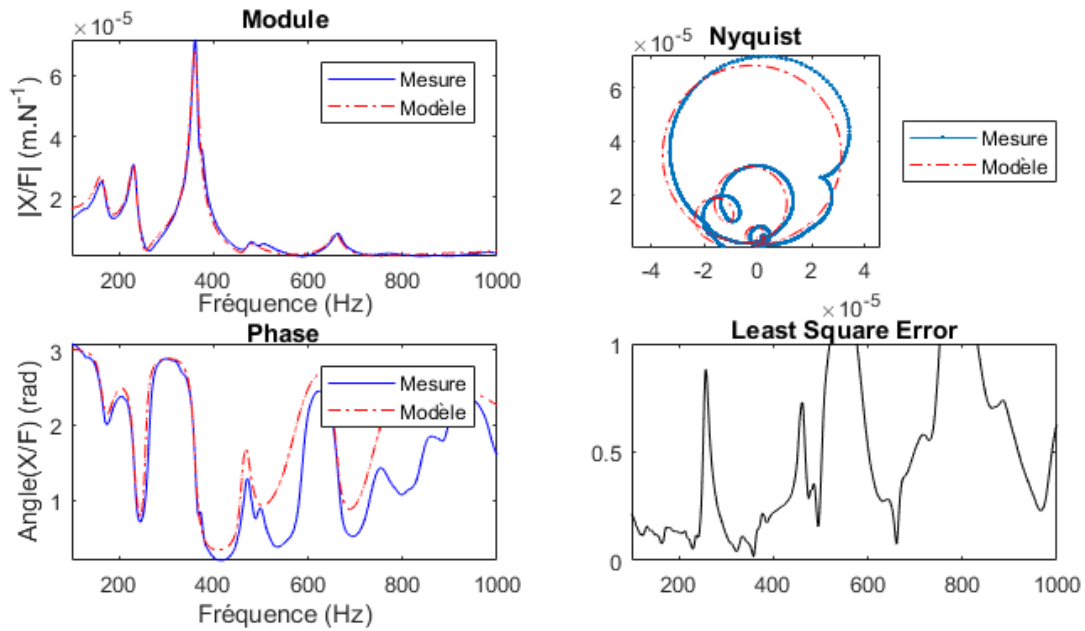


FIGURE C.10 – Exemple du résultats du programme de lissage - Harpe Fang

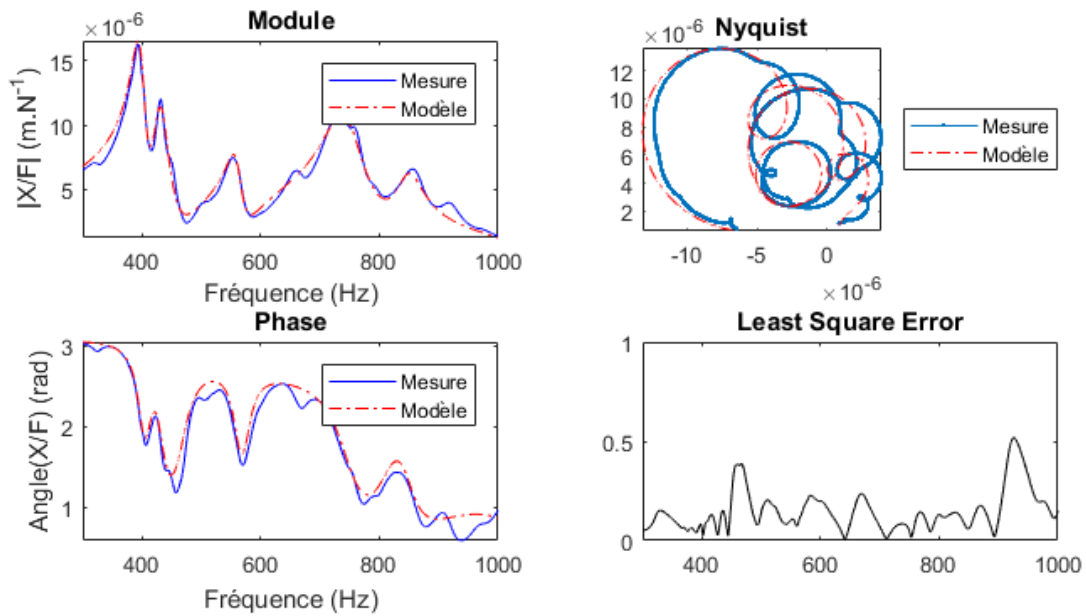


FIGURE C.11 – Exemple du résultats du programme de lissage - Harpe Tsogho

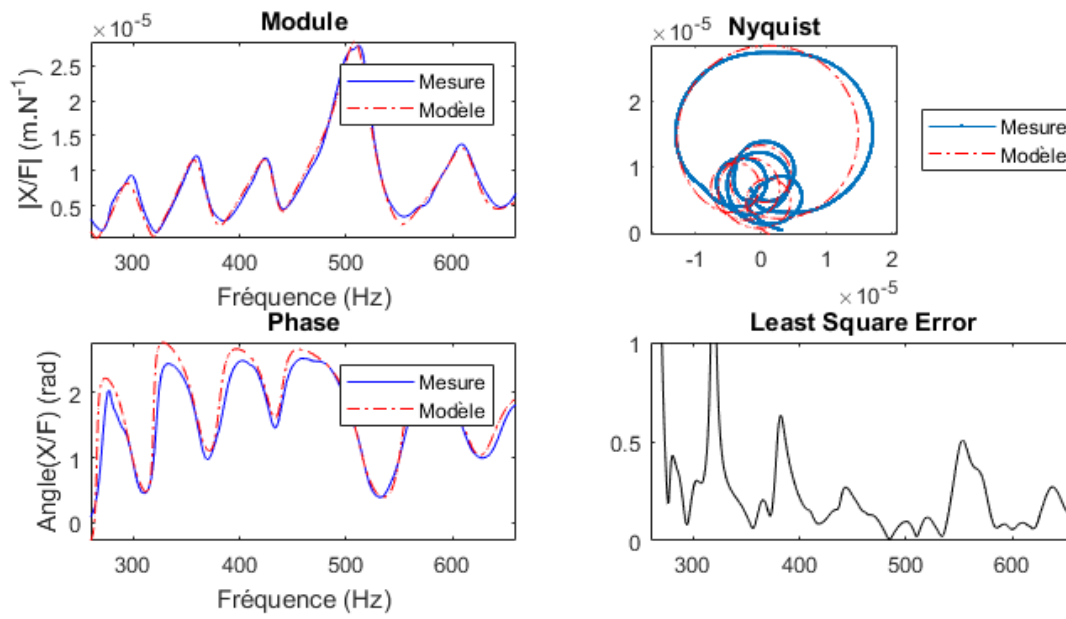


FIGURE C.12 – Exemple du résultats du programme de lissage - Harpe Massango

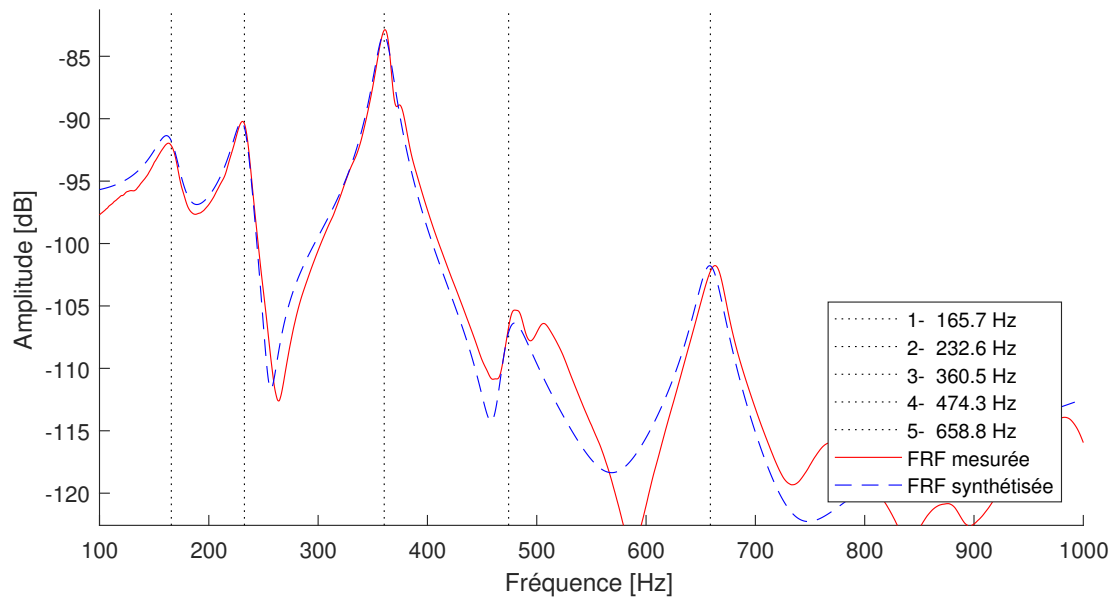


FIGURE C.13 – Identification par lissage des fréquences propres pour une FRF de la harpe Fang

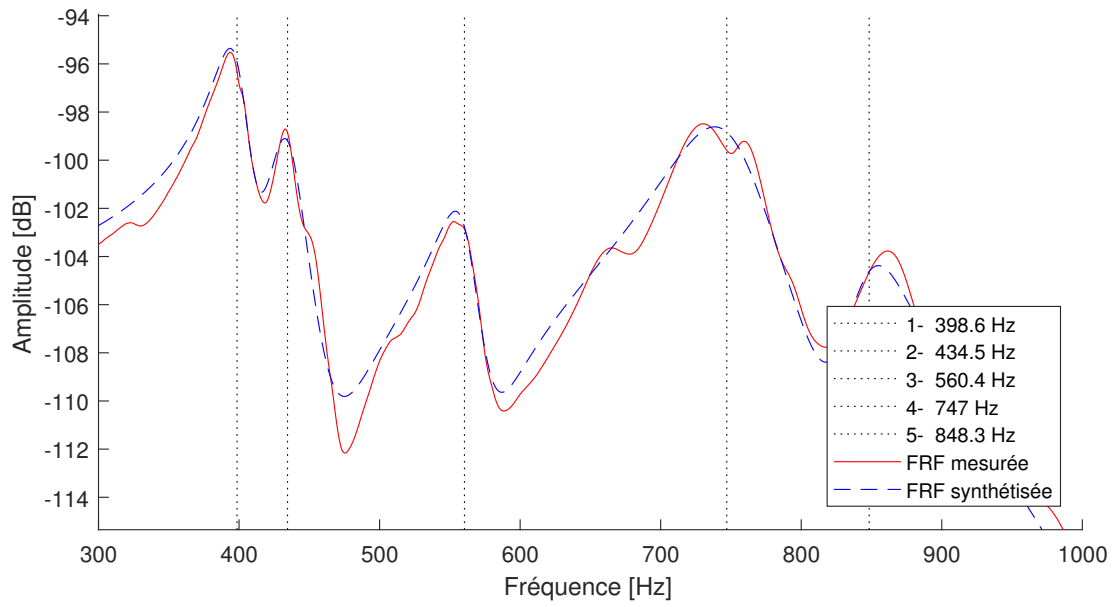


FIGURE C.14 – Identification par lissage des fréquences propres pour une FRF de la harpe Tsogho

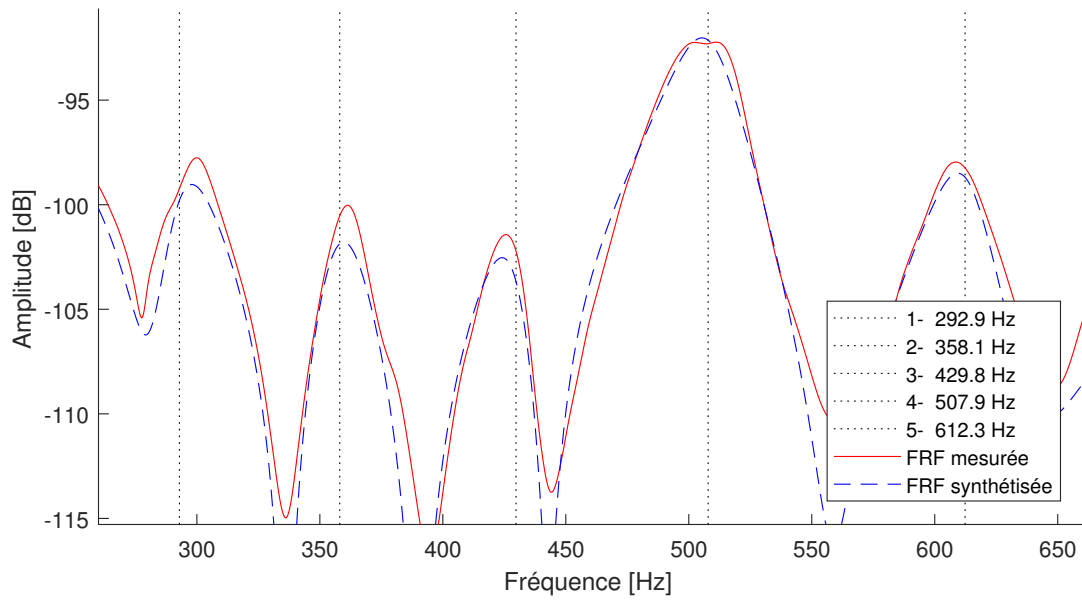


FIGURE C.15 – Identification par lissage des fréquences propres pour une FRF de la harpe Massango

	Fréquences par condition [Hz]											
mode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	165,71	169,97	166,71	164,99	165,60	166,42	166,42	165,88	167,24	165,82	165,86	166,55
2	232,57	232,19	232,82	233,25	232,00	232,52	232,66	232,65	233,05	232,42	232,33	232,61
3	360,46	359,58	361,72	360,69	358,57	360,21	361,10	359,41	362,20	360,20	358,20	360,49
4	474,27	472,76	473,88			470,41	473,89	474,81	474,44	473,17	471,68	472,86
5	501,56	512,29	500,78	511,43	514,75	500,95						
6	658,84	656,06	660,71	660,38	657,01	657,81	658,46	655,81	660,49	657,11	656,16	657,71
7	665,05	664,42	663,89	662,53	659,64	661,64	662,25	660,88	663,58	661,37	657,93	661,96
8	775,06	770,01	762,05	775,44	761,57	758,51	761,94	787,01	765,00	779,92		764,80
9			858,95		857,77	853,88	852,98		859,42			849,84

TABLE C.10 – Identification des fréquences modales - Harpe Fang

	Amortissement par condition [%]											
mode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	7,57	11,16	6,2	8,31	7,22	6,67	6,22	7,18	5,74	7,02	7,78	6,45
2	3,66	4,46	3,36	3,97	3,74	3,54	3,41	3,78	3,22	3,62	4,02	3,49
3	2,37	2,4	2,34	2,24	2,34	2,34	2,25	2,19	2,25	2,32	2,42	2,31
4	2,78	1,06	3,04			2,83	2,39	1,93	2,48	2,48	2,27	2,28
5	2,11	3,13	2,4	3,28	3,56	2,27						
6	1,84	1,99	1,77	1,68	1,86	1,8	1,76	1,48	1,7	1,83	2,05	1,84
7	1,77	1,77	1,75	1,73	1,97	1,8	1,76	1,72	1,69	1,89	2,18	1,8
8	5,1	5,11	3,12	3,62	2,02	2,68	3,19	4,74	3,21	3,89		3,55
9			3,18		1,66	3,01	3,63		3,03			3,55

TABLE C.11 – Identification des amortissements modales - Harpe Fang

	Fréquences par condition [Hz]											
mode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	398,59	397,94	399,05	398,15	398,02	398,64	398,75	398,05	398,72	398,69	398,42	398,90
2	434,50	432,58	437,18	432,38	432,20	432,73	432,51	431,69	432,72	432,33	430,89	432,39
3	560,38	558,70	564,86	558,56	557,48	562,93	560,13	557,14	562,06	558,31	556,19	560,47
4	747,02	734,87	761,18	737,17	735,40	753,15	746,07	739,06	749,96	740,42	736,07	746,07
5	848,34	851,26	858,48	851,16	847,73	857,88	848,94	842,59	854,79	844,18	842,22	853,11

TABLE C.12 – Identification des fréquences modales - Harpe Tsogho

	Amortissement par condition [%]											
mode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	3,26	3,53	2,9	3,39	3,43	3,11	3,15	3,38	3	3,19	3,39	3,08
2	3,27	2,43	4,17	2,65	2,57	3,29	3,36	3,19	3,53	3,4	3,06	3,38
3	2,79	2,67	2,62	2,61	2,72	2,48	2,49	3,18	2,34	2,65	2,69	2,31
4	5,26	5,12	4,85	5,14	4,9	5,36	4,79	5,11	4,97	4,79	4,7	4,56
5	3,25	2,23	3,14	2,38	2,56	2,69	3,04	3,75	2,81	3,14	3,47	2,63

TABLE C.13 – Identification des amortissements modales - Harpe Tsogho

	Fréquences par condition [Hz]											
mode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	301,77		303,68	277,21	276,86	299,71	295,95	276,06	300,24	295,68	292,90	299,03
2	373,33	378,18	376,39	363,43	361,40	366,03	360,77	357,91	362,96	360,13	358,08	360,94
3	453,24	470,40	459,19	436,19	431,77	440,37	433,60	430,90	430,12	429,16	429,77	427,87
4	526,46	536,24	529,59	520,78	517,69	522,63	513,68	512,44	516,68	511,61	507,87	513,82
5	623,05	613,98	622,29	615,51	611,01	618,99	617,73	616,71	614,74	613,73	612,35	613,63
6	710,59		716,84	695,58	692,52	698,31	679,10	678,55	684,86	677,20	672,78	676,67
7		731,09	724,5				747,29	747,58		744,20	743,56	744,72
8	813,62	822,37	818,03	848,51	841,27	842,74	834,37	839,79	819,09	830,99	837,39	818,75
9	866,08	887,01	877,20	918,82	915,35	917,79	916,43	915,75	912,91	917,03	925,77	913,65
10	930,57	952,16	943,60	959,85	951,08	960,23	948,96	946,33	939,97	942,68	935,92	941,88

TABLE C.14 – Identification des fréquences modales - Harpe Massango

	Amortissement par condition [%]											
mode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	3,69		3,64	1,73	1,9	3,72	4,47	1,93	3,68	4,39	4,6	3,78
2	2,45	2,81	2,29	2,85	2,96	2,71	3,74	3,56	2,69	3,52	4,08	3
3	3,31	1,86	3,31	2,35	2,26	2,05	3,07	2,99	2,03	2,5	3,21	2,31
4	2,31	2,09	2,16	2,67	2,78	2,66	2,93	3,03	2,53	2,85	3,23	2,53
5	4,08	3,25	5,37	2,41	2,55	2,44	2,16	2,21	2,82	2,59	2,43	2,62
6	3,09		3,14	3,17	3,6	2,85	1,9	2,13	2,2	2,17	2,12	2,18
7		3,53	2,19				1,16	1,07		1,1	1,15	1,22
8	1,36	2,19	1,47	3,15	3,46	2,53	2,84	3,37	1,96	3,21	3,34	2,11
9	2	2,42	1,76	1,74	1,99	1,65	2,63	2,45	2,71	2,44	2,1	2,45
10	1,83	3,18	2,08	1,35	1,4	1,27	1,64	1,85	1,33	1,97	3,28	1,34

TABLE C.15 – Identification des amortissements modales - Harpe Massango

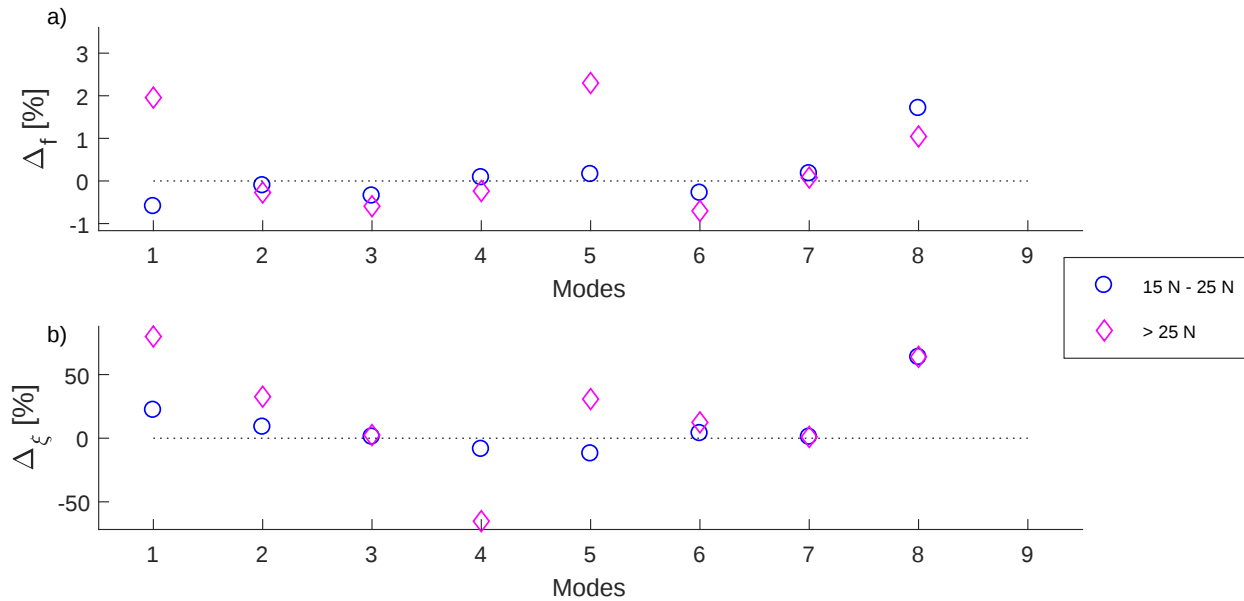


FIGURE C.16 – Harpe Fang : Embout en acier et technique avec potence
a) Variation de fréquence b) Variation d'amortissement

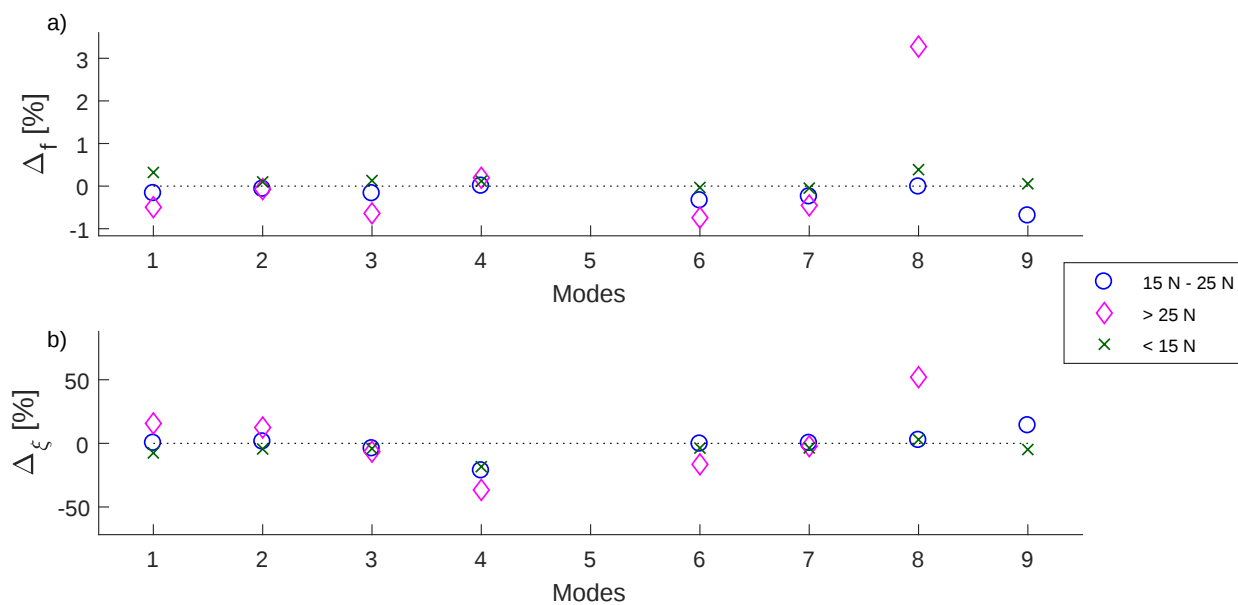


FIGURE C.17 – Harpe Fang : Embout en acier et technique sans potence
a) Variation de fréquence b) Variation d'amortissement

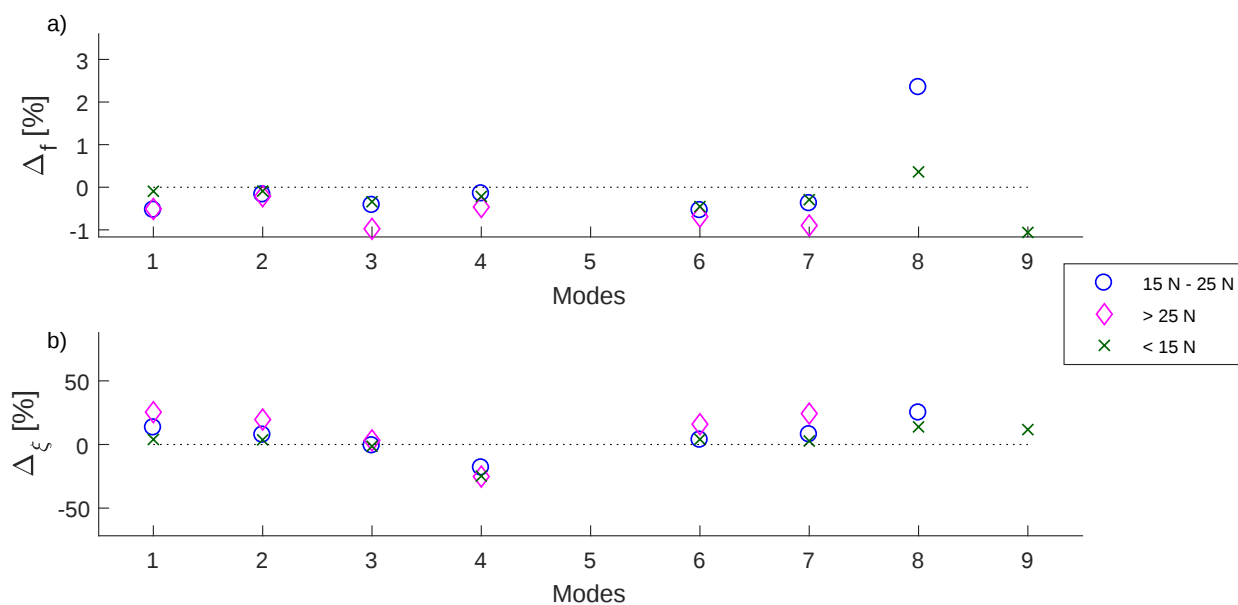


FIGURE C.18 – Harpe Fang : Embout en vinyle et technique sans potence
a) Variation de fréquence b) Variation d'amortissement

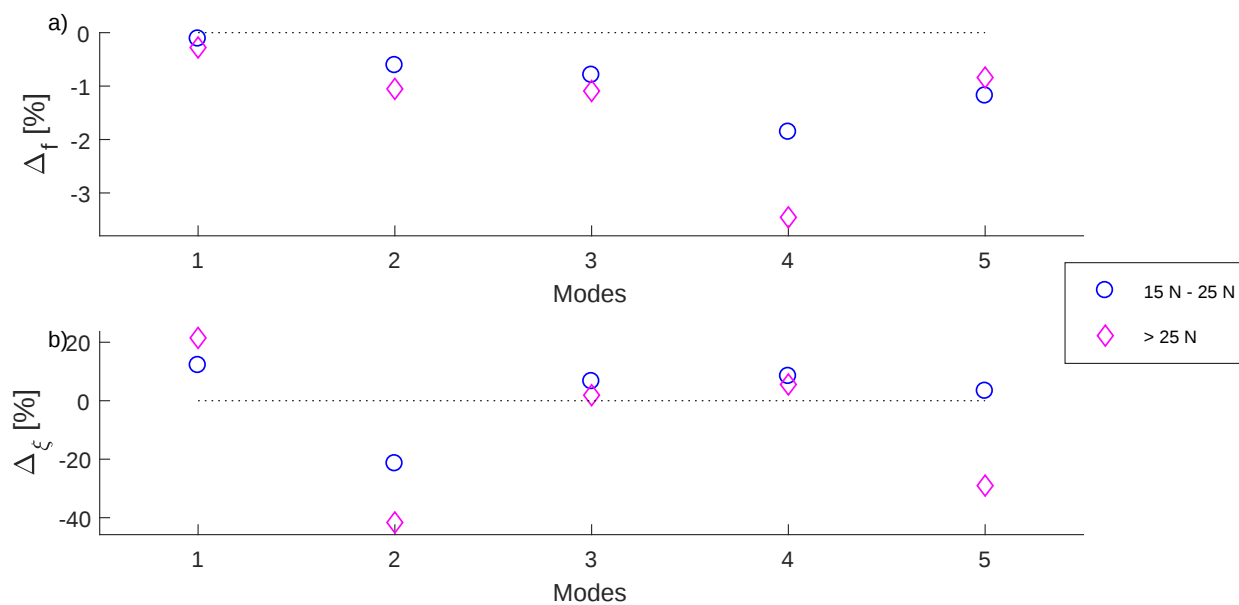


FIGURE C.19 – Harpe Tsogho : Embout en acier et technique avec potence
a) Variation de fréquence b) Variation d'amortissement

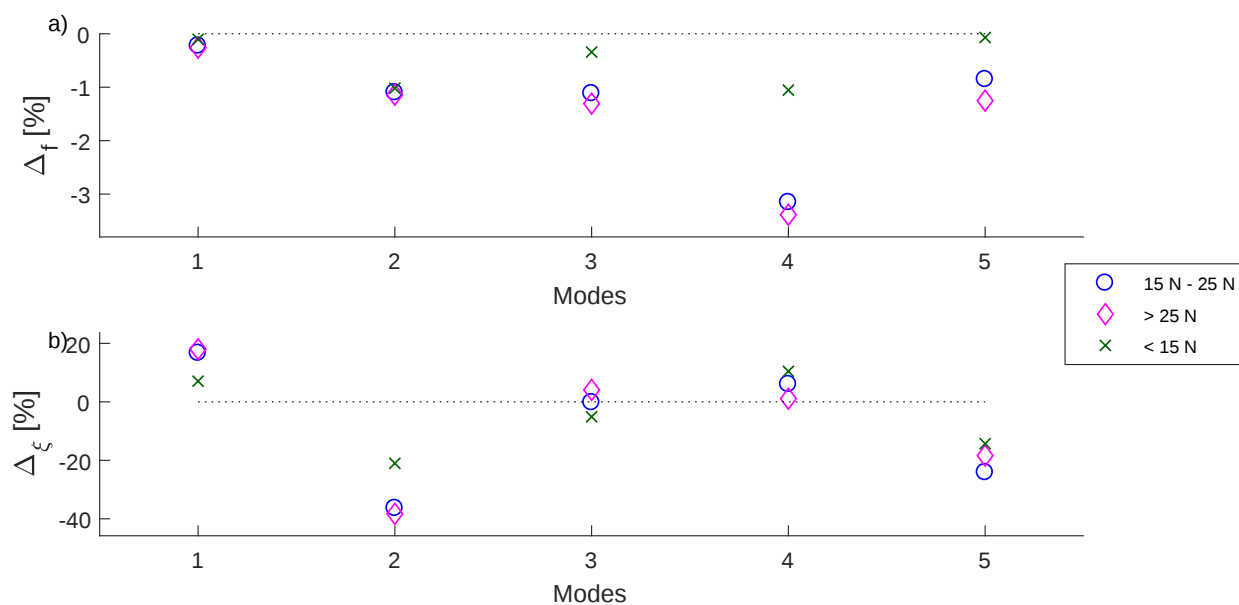


FIGURE C.20 – Harpe Tsogho : Embout en vinyle et technique avec potence
a) Variation de fréquence b) Variation d'amortissement

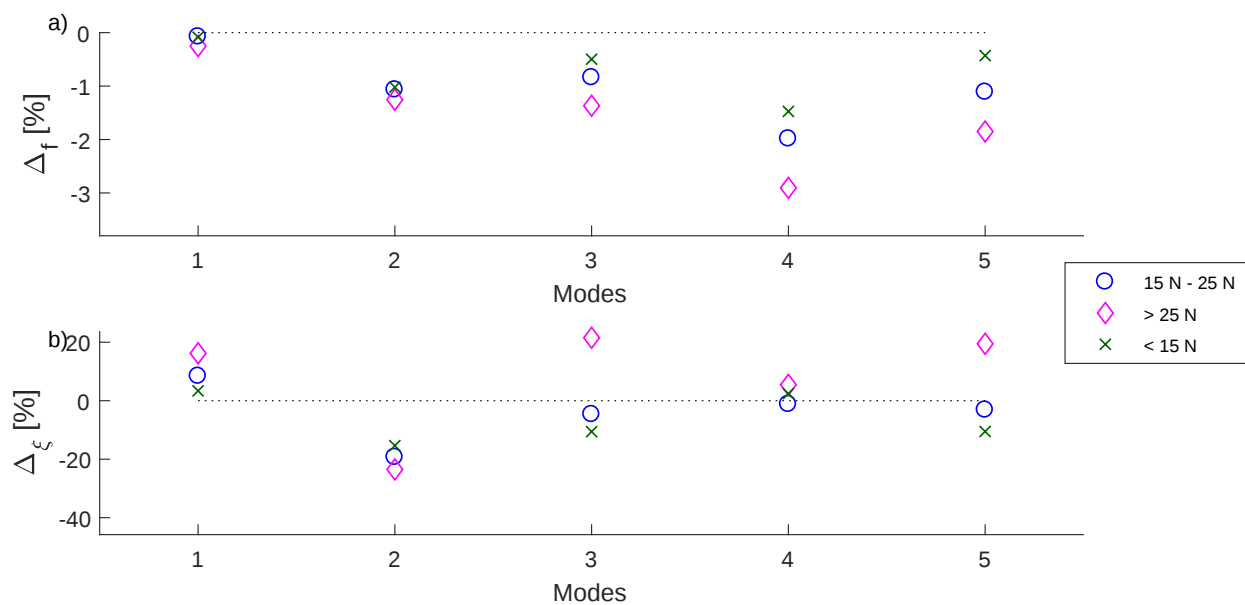


FIGURE C.21 – Harpe Tsogho : Embout en acier et technique sans potence
a) Variation de fréquence b) Variation d'amortissement

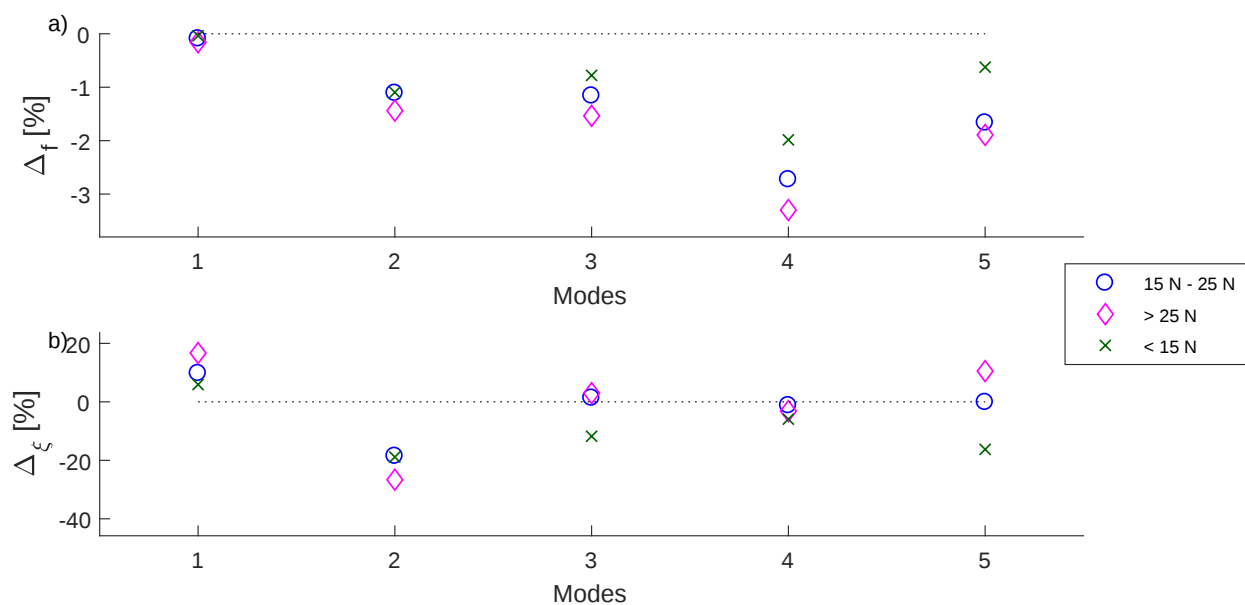


FIGURE C.22 – Harpe Tsogho : Embout en vinyle et technique sans potence
a) Variation de fréquence b) Variation d'amortissement

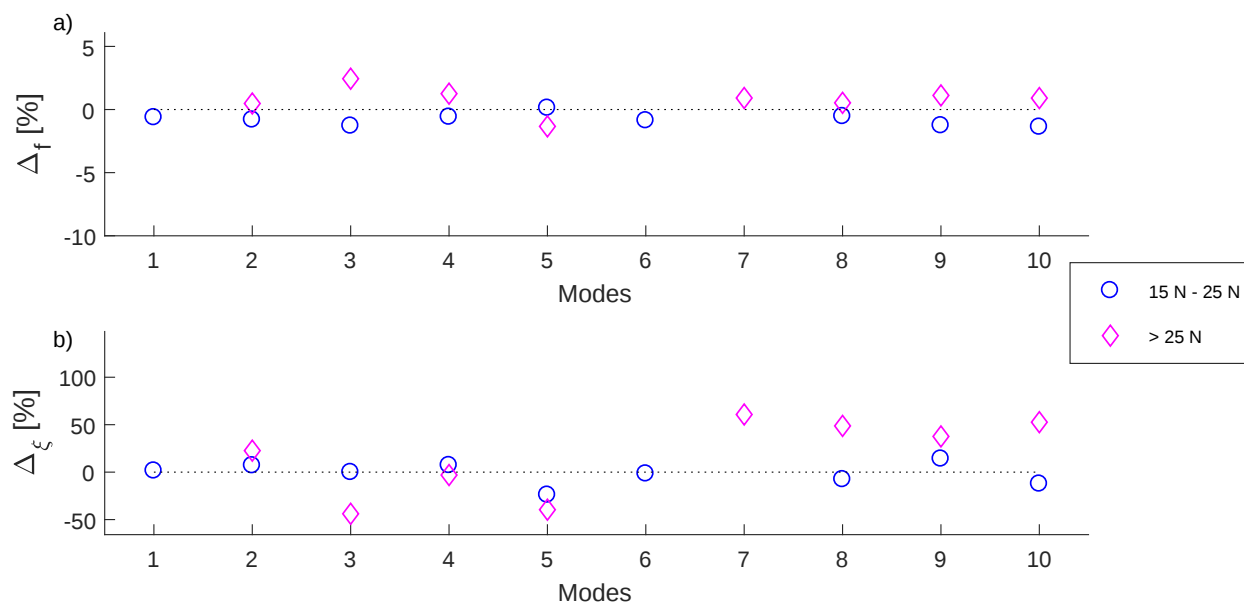


FIGURE C.23 – Harpe Massango : Embout en acier et technique avec potence
a) Variation de fréquence b) Variation d'amortissement

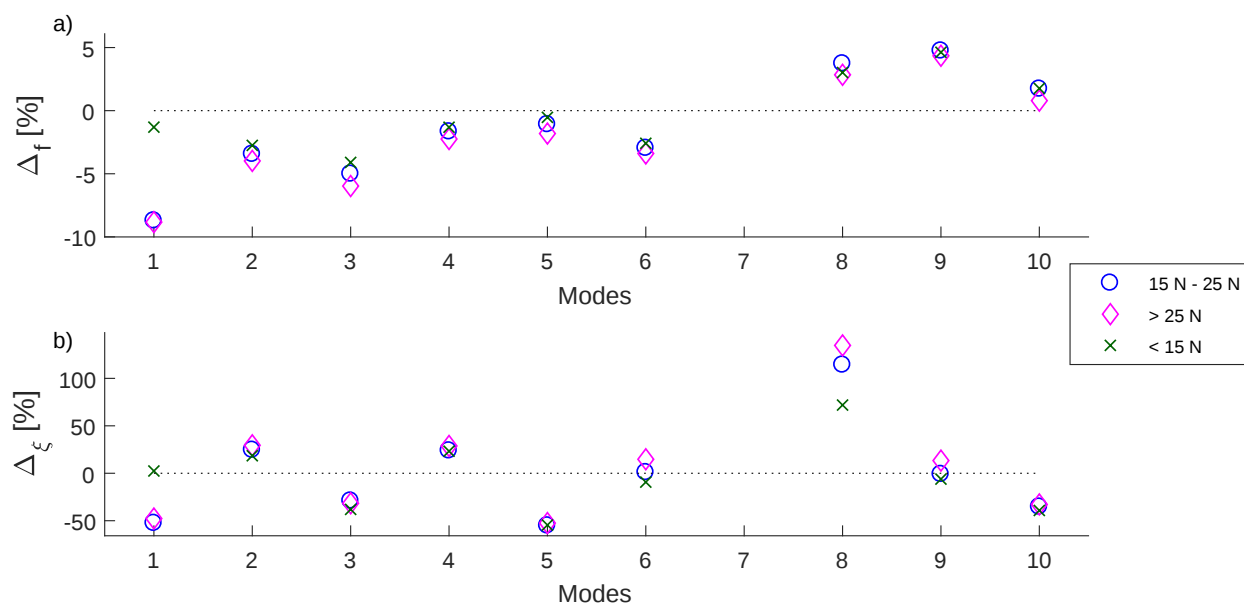


FIGURE C.24 – Harpe Massango : Embout en vinyle et technique avec potence
a) Variation de fréquence b) Variation d'amortissement

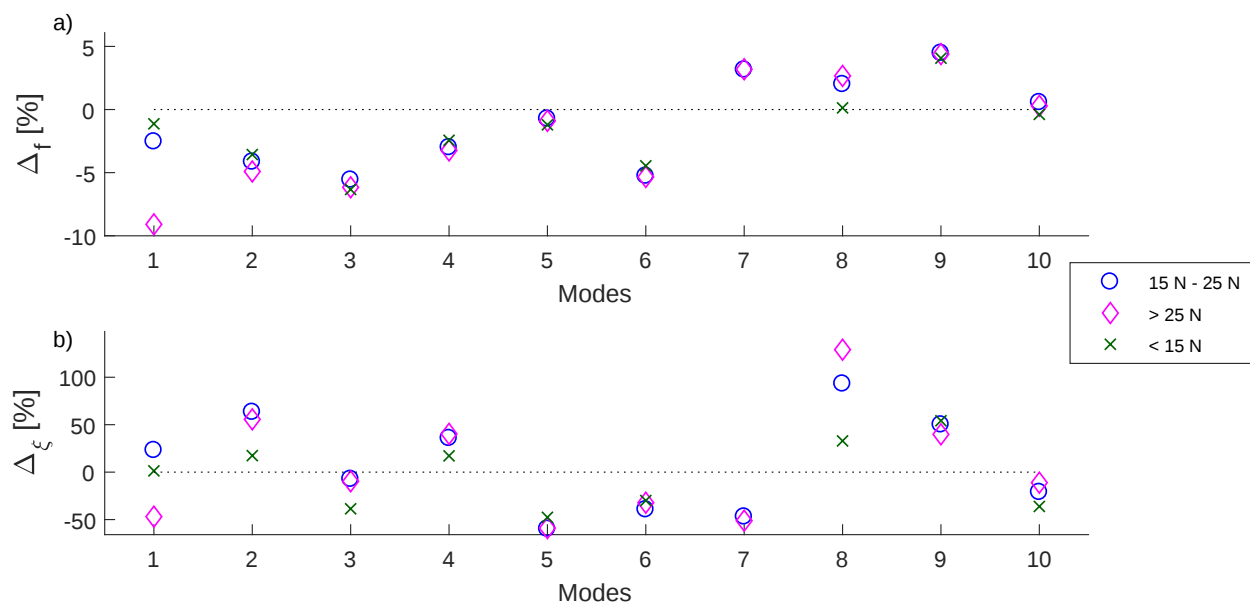


FIGURE C.25 – Harpe Massango : Embout en acier et technique sans potence
a) Variation de fréquence b) Variation d'amortissement

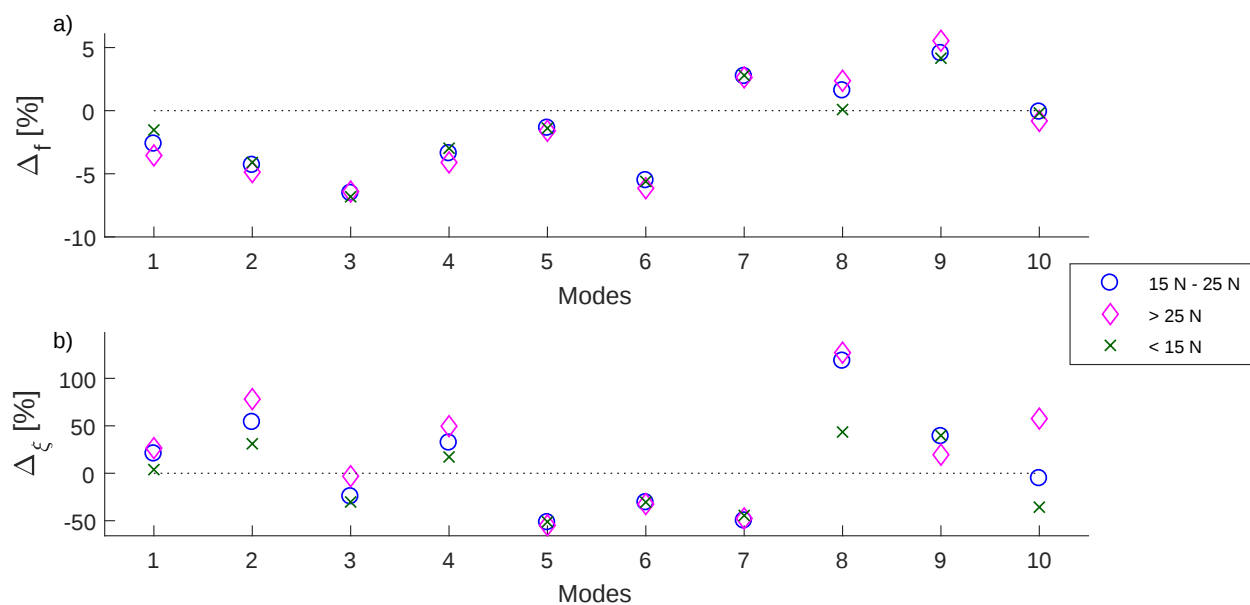


FIGURE C.26 – Harpe Massango : Embout en vinyle et technique sans potence
a) Variation de fréquence b) Variation d'amortissement

C.8 Résultats de l'identification modale par spectre

C.8.1 Spectrogramme

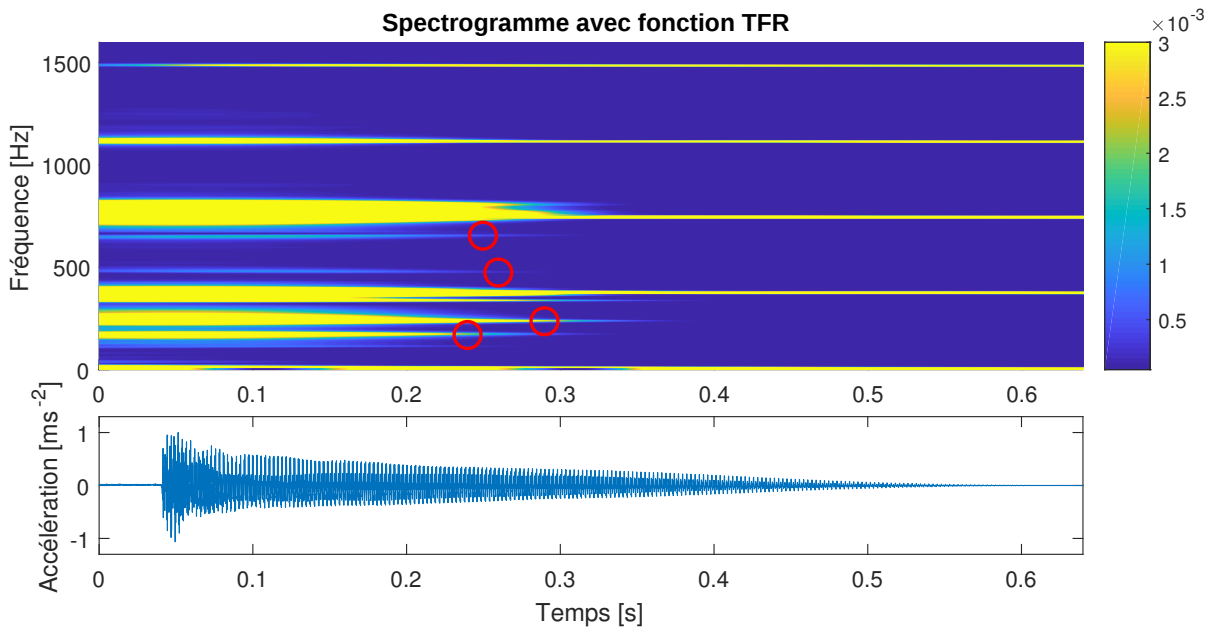


FIGURE C.27 – Harpe Fang. Identification de modes sur le spectrogramme du transitoire
Fréquences entourées : 165 Hz, 232 Hz, 470 Hz, 650 Hz

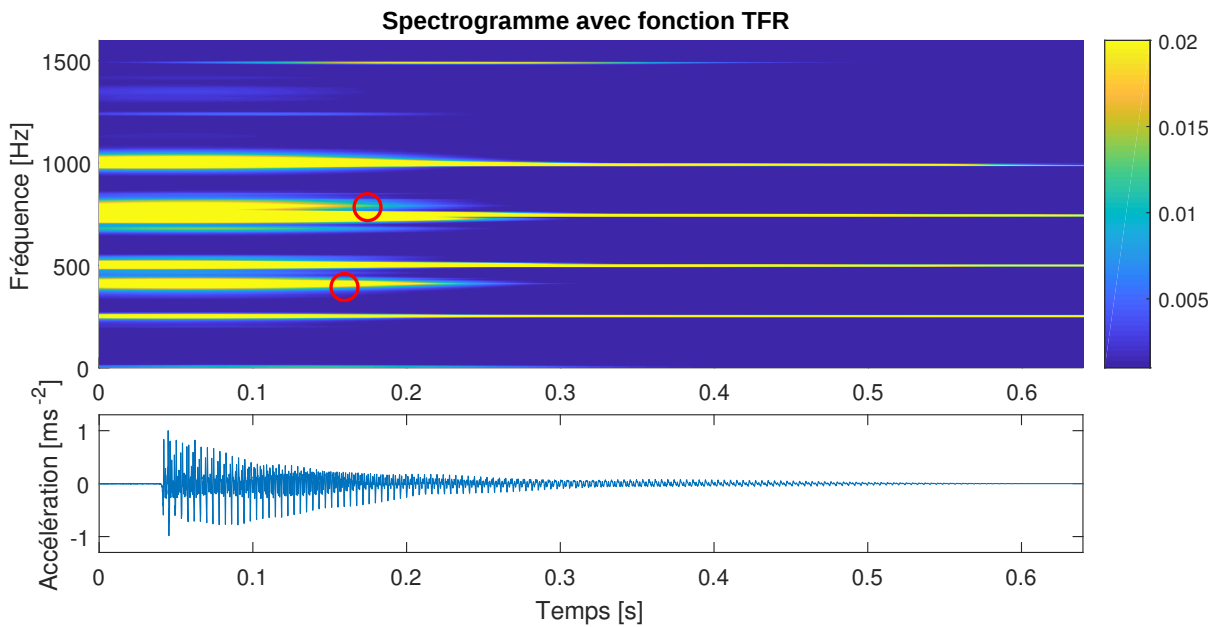


FIGURE C.28 – Harpe Tsogho. Identification de modes sur le spectrogramme du transitoire
Fréquences entourées : 390 Hz, 780 Hz

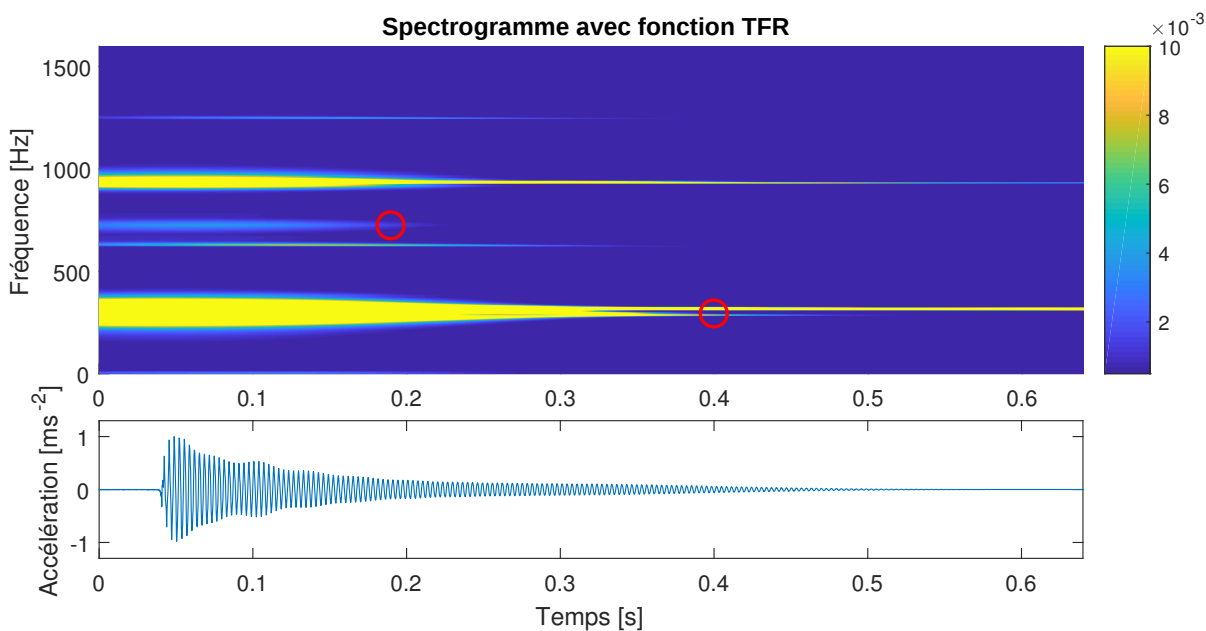


FIGURE C.29 – Harpe Massango. Identification de modes sur le spectrogramme du transitoire
Fréquences entourées : 290 Hz, 720 Hz

C.8.2 Spectre

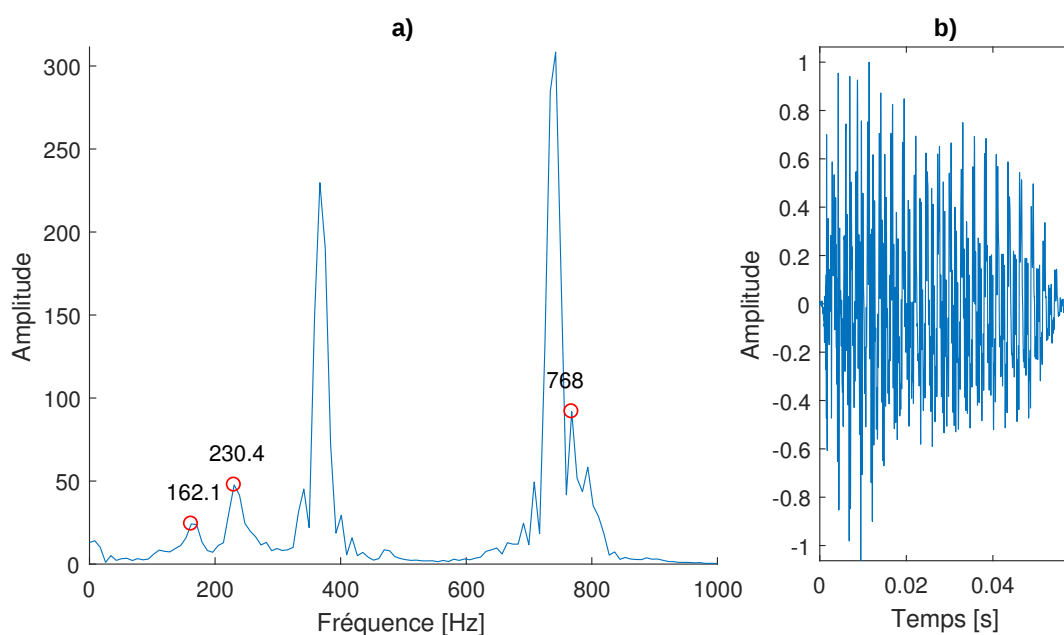


FIGURE C.30 – Harpe Fang. Identification de modes sur le spectre du transitoire
a) Spectre b) Signal temporel

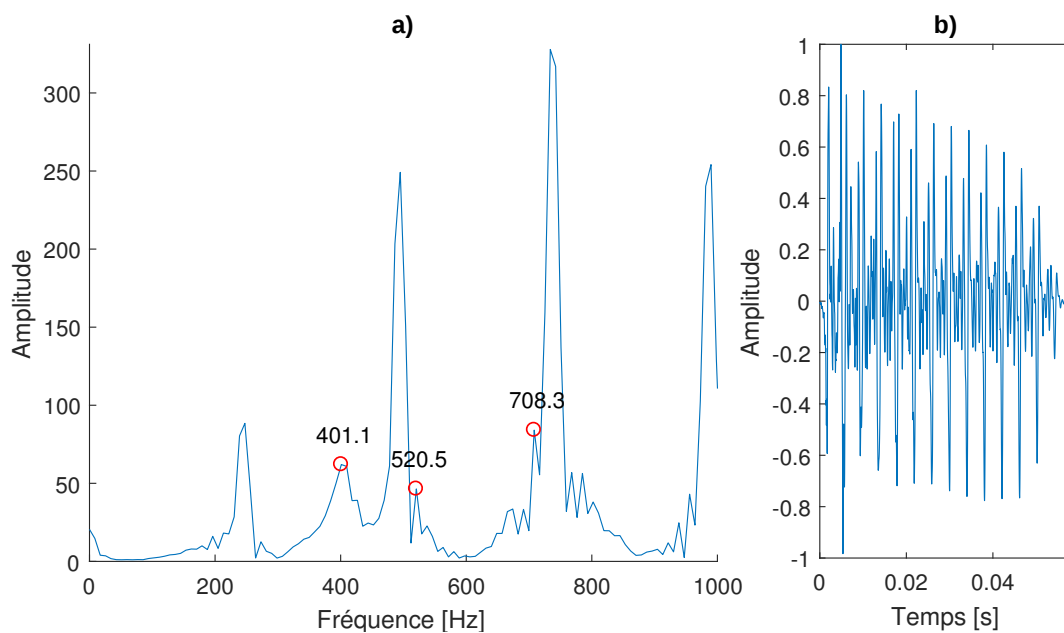


FIGURE C.31 – Harpe Tsogho. Identification de modes sur le spectre du transitoire
a) Spectre b) Signal temporel

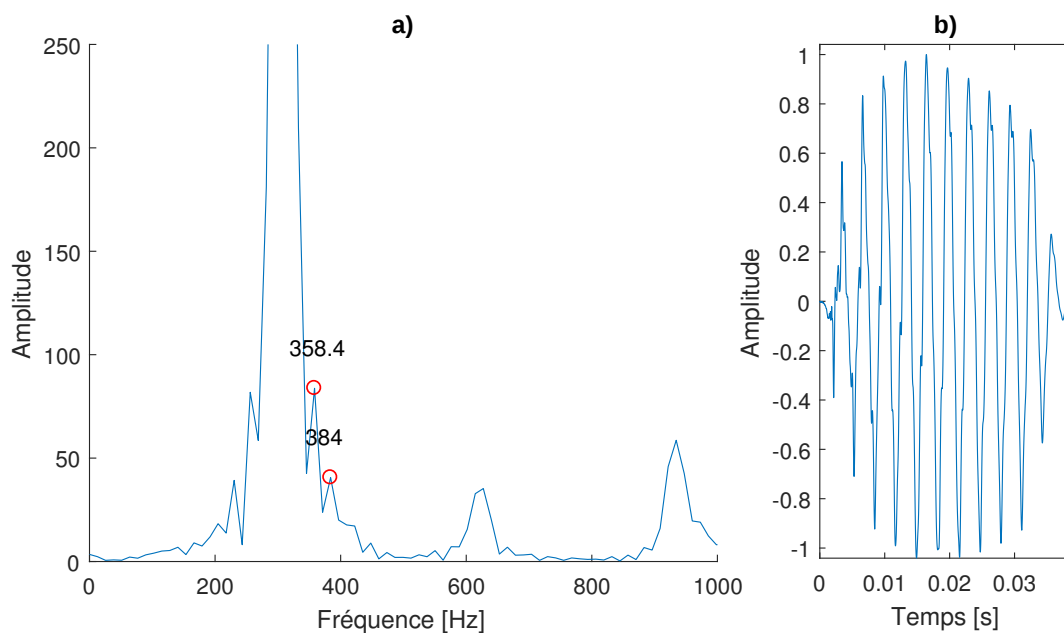


FIGURE C.32 – Harpe Massango. Identification de modes sur le spectre du transitoire
a) Spectre b) Signal temporel

C.9 Cartes de mobilité

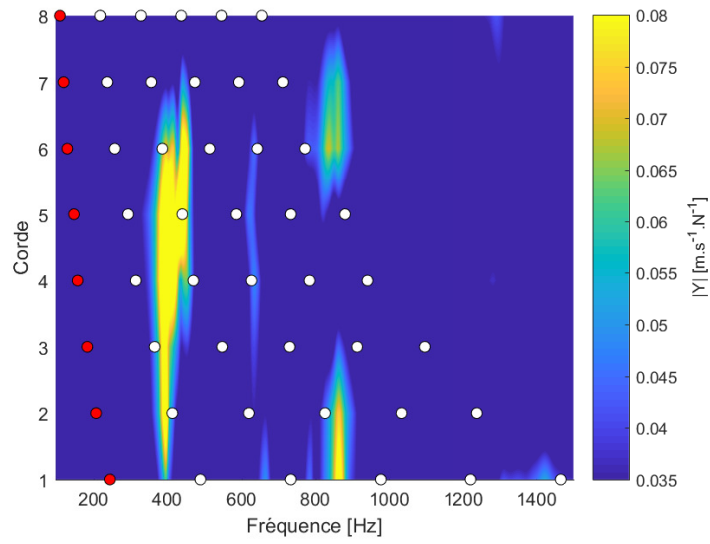


FIGURE C.33 – Carte de mobilité pour la Harpe Tsogho

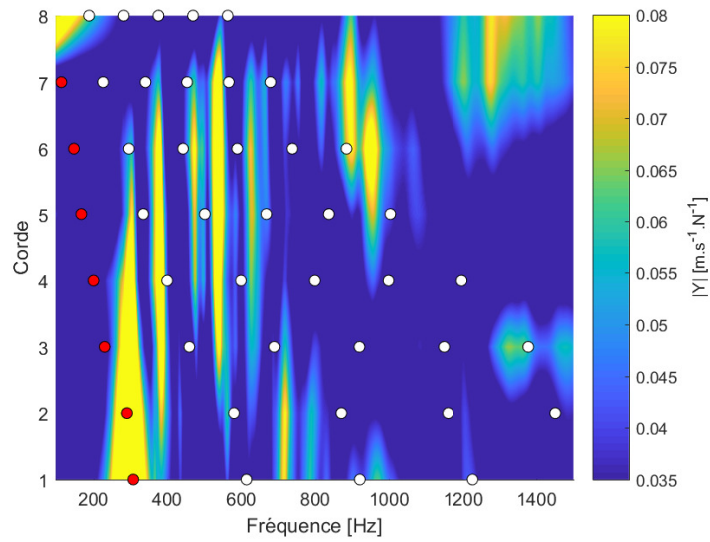


FIGURE C.34 – Carte de mobilité pour la Harpe Massango

Bibliographie

- [1] Stanislaw Świdorski. La harpe sacrée dans les cultes syncrétiques au gabon. *Anthropos*, 65(H. 5./6) :833–857, 1970.
- [2] Pierre Sallée. *L’arc et la harpe : contribution à l’histoire de la musique du Gabon*. PhD thesis, Paris X, 1985.
- [3] Marie-France Mifune. *Performance et construction identitaire : Une approche interdisciplinaire du culte du bwiti chez les Fang du Gabon*. PhD thesis, Paris, EHESS, 2012.
- [4] E. de Dampierre, P. Bruguière, J.L. Grootaers, France) Musée de la musique (Paris, M. Brandily, France) Cité de la musique (Paris, and Société d’ethnologie. *Song of the River : Harps of Central Africa : (29 May - 29 August 1999)*. Cité de la Musique, 1999.
- [5] Marc Vignal. *Dictionnaire de la musique*. Larousse, 2011.
- [6] Thomas Rossing. *The Science of String Instruments*. Springer-Verlag New York, 2020.
- [7] Lawrence E Kinsler, Austin R Frey, Alan B Coppens, and James V Sanders. *Fundamentals of acoustics*. Wiley, 1999.
- [8] Chris Waltham and Andrzej Kotlicki. Vibrational characteristics of harp soundboards. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(3) :1774–1780, 2008.
- [9] Antoine Chaigne and Jean Kergomard. *Acoustique des instruments de musique*. Belin, 2008.
- [10] David J Ewins. *Modal testing : theory and practice*, volume 15. Research studies press Letchworth, 1984.
- [11] Jean Piranda. *Analyse modale expérimentale*. Techniques de l’ingénieur, 2001.
- [12] Bart Peetersa, Herman Van der Auweraera, Patrick Guillaume, and Jan Leuridana. The polymax frequency-domain method : a new standard for modal parameter estimation? *Shock and vibration*, 2004.
- [13] Benjamin Elie. *Caractérisation vibratoire et acoustique des instruments á cordes - Application á l’aide á la facture instrumentale*. PhD thesis, Université du Maine, 2012.
- [14] Jer-Nan Juang and Richard S Pappa. An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction. *Journal of Guidance*, 8(5) :620–627, 1985.
- [15] François Auger, Patrick Flandrin, Paulo Gonçalves, and Olivier Lemoine. *Time-frequency toolbox*. CNRS (France), Rice University (USA), 1996.
- [16] Jean-Loic Le Carrou, Quentin Leclere, and Francois Gautier. Some characteristics of the concert harp’s acoustic radiation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127(5) :3203–3211, 2010.
- [17] Jean-Loïc Le Carrou, François Gautier, Joël Gilbert, and JRF Arruda. Low frequency model of the sound radiated by a concert harp. In *Proceedings of the Forum Acusticum, Budapest, Hungary*, 2005.