



Musician / instrument interaction: the case of the concert harp

Delphine Chadeaux

► To cite this version:

Delphine Chadeaux. Musician / instrument interaction: the case of the concert harp. Acoustics [physics.class-ph]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2012. English. NNT : 2012PAO66569 . tel-00828314v1

HAL Id: tel-00828314

<https://theses.hal.science/tel-00828314v1>

Submitted on 30 May 2013 (v1), last revised 20 Nov 2013 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**THESE DE DOCTORAT DE
L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE**

Spécialité :
Acoustique

Présentée par :
Delphine Chadeaux

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE

Sujet de la thèse :

**INTERACTION MUSICIEN/INSTRUMENT :
LE CAS DE LA HARPE DE CONCERT.**

Soutenue le : 26 octobre 2012

devant le jury composé de

Mme. Sylvie Gibet, Professeur à l'Université de Bretagne Sud	Rapporteur
M. Antoine Chaigne, Professeur à l'ENSTA	Rapporteur
M. Anders Askenfelt, Professeur au KTH	Examineur
M. Vincent Hayward, Professeur à l'UPMC	Examineur
M. Marcelo Wanderley, Professeur à l'Université de McGill	Examineur
M. Benoît Fabre, Professeur à l'UPMC	Directeur de thèse
M. Jean-Loïc Le Carrou, Maître de conférences à l'UPMC	Co-Directeur de thèse
M. Laurent Daudet, Professeur à l'Université Paris Diderot	Co-Directeur de thèse

Institut Jean Le Rond d'Alembert,
Equipe Lutheries, Acoustique, Musique,
11, rue de Lourmel, 75015 PARIS, FRANCE

Ecole doctorale SMAER,
4, place Jussieu, BC 270,
75252, PARIS cedex 05, FRANCE

Table des matières

Table des matières	iv
I Introduction générale	1
1 Présentation	3
1.1 Mise en contexte	3
1.2 Etude du contrôle instrumental	4
1.3 Positionnement de l'étude	6
2 La harpe de concert	7
2.1 Présentation de l'instrument	7
2.2 Posture du harpiste	10
2.3 Discussion	14
3 Enjeux scientifiques	17
3.1 Intérêts de l'étude	17
3.2 Problématiques et contributions	18
3.3 Organisation du manuscrit	19
II Etude expérimentale de l'interaction musicien/instrument	21
Avant-propos	23
4 Gestural strategies in the harp performance	27
4.1 Introduction	28
4.2 Experimental procedure	29
4.2.1 Measurement protocol	29
4.2.2 Gesture segmentation	30
4.2.3 Analysis systems of reference	32
4.3 Acoustical descriptors	32
4.4 Descriptors of the musical gestures	34
4.4.1 Kinematical description	34

4.4.2	Reaction forces and moments	35
4.4.3	Gesture's smoothness	36
4.5	Discussion	37
4.5.1	Harpists' global posture	37
4.5.2	Control of the arm	39
4.5.3	Description of hand gestures	41
4.5.4	Relation to the sound production	41
4.6	Conclusion	45
5	Experimentally-based description of harp plucking	47
5.1	Introduction	48
5.2	Experimental procedure	49
5.2.1	Experimental setup	49
5.2.2	Measurement protocol	52
5.3	Descriptors of the harp plucking	52
5.3.1	Temporal phases	53
5.3.2	Finger and string trajectories	53
5.3.3	Initial conditions shape and velocity	56
5.3.4	Initial angle of polarization	56
5.3.5	Energy	57
5.3.6	Soundboard vibrations	57
5.4	Discussion	58
5.4.1	Characteristics of the harp string plucking	58
5.4.2	Characteristics of the free oscillation	65
5.5	Conclusion	68
III	Modélisation de l'interaction doigt/corde	71
Avant-propos		73
6	Harp plucking robotic finger	77
6.1	Introduction	78
6.2	Plucking description	78
6.3	Robotic finger description	79
6.3.1	Description	79
6.3.2	Fingertip shape and material	80
6.4	Experimental procedure	81
6.4.1	Experimental setup	81
6.4.2	Measurement protocol	82
6.5	Results	83
6.5.1	Robotic finger repeatability	83
6.5.2	Plucking action reliability	84

6.5.3	Initial conditions of the string vibrations	84
6.5.4	Soundboard vibrations	86
6.6	Conclusion	89
7	Harp plucking modeling	91
7.1	Introduction	92
7.2	Harp plucking action modeling	93
7.2.1	Sticking phase	93
7.2.2	Slipping phase	96
7.2.3	Summary	98
7.3	Experimental procedure	99
7.4	Plucking parameters estimation	100
7.4.1	Sticking parameters	100
7.4.2	Slipping parameters	103
7.4.3	Reconstruction of isolated plucking	104
7.5	Influence of plucking on string oscillations	105
7.5.1	Method	105
7.5.2	Results	107
7.5.3	Discussion	109
7.6	Application to a musical context	109
7.7	Conclusion	112
IV	Conclusions et perspectives	115
	Bibliographie	133
V	Annexes	135
A	Contextes expérimentaux	137
A.1	Protocoles de mesures	137
A.2	Positionnement des marqueurs	142
B	Répétabilité des gestes musicaux	145
C	Mesures des déplacements de corde	149
C.1	Détermination de la trajectoire d'un objet	149
C.1.1	Exposition du problème et notations	149
C.1.2	Expression des déplacements	150
C.2	Incertitudes de mesures : expressions générales	151
C.2.1	Incertitudes-types sur les trajectoires	151
C.2.2	Incertitudes-types sur les grandeurs d'entrée	153
C.3	Incertitudes de mesures : estimations	155

C.3.1	Grandeurs d'entrée indépendantes de la méthode de traitement d'images .	155
C.3.2	Grandeurs d'entrée dépendantes de la méthode de traitement d'image . .	157
C.3.3	Bilan	158
C.4	Application	159
D	Rotation initiale de la corde	161
D.1	Mise en équations	161
D.2	Résolution de l'équation de torsion	163
D.3	Résolution des équations de vibrations transverses	163
D.3.1	Détermination de la solution de l'équation homogène	163
D.3.2	Détermination des solutions particulières des équations de vibrations trans- verses	165
D.3.3	Bilan	166
D.4	Influence de la rotation sur les oscillations libres de la corde	167
D.4.1	Méthode	167
D.4.2	Résultats	168
E	Comparaison des performances de deux modèles d'accroche	171
	Table des tableaux	176
	Table des figures	180
	Résumé/Abstract	181

Première partie

Introduction générale

Chapitre 1

Présentation

1.1 Mise en contexte

L'apprentissage d'une discipline, quelle qu'elle soit, est progressive et nécessite une pratique assidue. Généralement, il est considéré que le minimum requis afin de devenir expert dans un domaine est d'une dizaine d'années [Williamon 2004], ou encore de 10000 heures [Ericsson et al. 1993] de pratique. Cette estimation s'applique tant aux domaines sportifs, intellectuels, techniques, qu'artistiques. Dans ce dernier cas, et plus particulièrement celui de la musique, l'apprentissage d'un instrument implique le développement par étape de plusieurs compétences sous-jacentes. Notamment, il faudra en premier lieu apprendre à produire une note, puis à en contrôler les attributs acoustiques (niveau sonore, justesse, ...) avec précision, et à répéter cette tâche de manière reproductible. Cependant, le seul contrôle instrumental n'est pas suffisant afin de devenir un musicien expert. Le développement de connaissances musicales et de capacités d'écoute est fondamental afin de mettre en regard la technique de jeu et l'intention musicale. Le musicien expert s'avère donc capable d'un contrôle gestuel suffisamment fin pour produire le mouvement adéquat à la production sonore désirée.

Néanmoins, l'ampleur de la gamme des possibilités de contrôle est intimement liée à la façon dont les instruments sont mis en vibration. Classiquement, on sépare les modes de jeu à oscillations entretenues (e.g. instruments à cordes frottées, à vent,...) et ceux à oscillations libres (e.g. instruments à cordes pincées, percussions,...). Dans le premier cas, il est communément dit que le son est un décalque du geste du musicien [D'Andréa-Novet et al. 2012]. En effet, le son est produit tant qu'il y a une interaction directe entre le musicien et l'instrument, notamment avec l'archet ou le souffle. Dans le cas d'un jeu en oscillations libres, le déclenchement d'une note s'effectue à l'instant où le contact entre le musicien et l'instrument cesse. Ainsi, la part de contrôle de l'instrumentiste sur le son est limitée à cette brève interaction, à laquelle vient éventuellement s'ajouter l'étouffement de la note. C'est donc également autour des mouvements amont et aval que l'instrumentiste va organiser son contrôle. Par conséquent, les possibilités de contrôle gestuel envisageables diffèrent grandement entre ces deux groupes d'instruments. Les marges de manœuvre laissées aux musiciens sont également dépendantes de l'instrument

considéré au sein même d'un groupe d'instruments. La géométrie, le poids et l'ergonomie de chaque instrument vont définir les limites et spécifications de l'espace physique dans lequel le musicien pourra évoluer. Ainsi, l'aisance des mouvements et des déplacements va directement influencer sur les stratégies de contrôle gestuel mises en place par l'instrumentiste.

1.2 Etude du contrôle instrumental

L'étude de l'interaction entre le musicien et son instrument peut être abordée de multiples manières. L'instrumentiste met effectivement en jeu divers types de contrôle afin de répondre aux nombreux objectifs musicaux suscités par l'interprétation d'une pièce. Ceux-ci ont été longuement traités dans des ouvrages dédiés à ce sujet [Godøy and Leman 2009; Gritten and King 2006; Genevois and de Vivo 1999; Imberty and Gratier 2007]. Les objectifs principaux retenus ici sont les suivants. Tout d'abord, il est fondamental d'exciter de la manière désirée la structure vibrante qu'est l'instrument. Ce premier objectif renvoie d'ores et déjà à, au moins, deux types de contrôle. L'un, lié à la gestuelle directement impliquée dans la production sonore, et l'autre aux mouvements facilitant celle-ci. Ensuite, l'interprétation d'un morceau nécessite de communiquer des informations aux éventuels autres musiciens, mais aussi de communiquer au public l'intention musicale associée. Ces objectifs sont remplis par le biais de divers mouvements de l'ensemble du corps. Enfin, une nécessité, plutôt qu'un objectif en soi pour l'instrumentiste, est de pouvoir jouer de son instrument en limitant la fatigue et les douleurs. Dans ce travail, nous aborderons brièvement cette dernière notion et nous nous concentrerons plus particulièrement sur l'analyse du premier objectif cité.

La problématique relative à la manière dont un instrument est mis en vibration a été étudiée pour nombre d'entre eux. Dans le cadre des instruments auto-entretenus, et plus particulièrement de ceux à cordes frottées, le contrôle de l'archet a été étudié. L'obligation de le maintenir orthogonal aux cordes afin de jouer du violoncelle à par exemple été soulignée [Winold et al. 1994]. Cette même étude a indiqué que cette contrainte impliquait un contrôle important de l'archet, régi par le poignet et le coude, induisant des efforts plus élevés aux articulations qu'entre l'archet et la corde même. De nombreuses études ont également porté sur les diverses techniques de jeu dépendamment du type de sonorité produite [Young and Deshmmane; Rasamimanana et al. 2006].

Le contrôle appliqué par l'instrumentiste dans le cas de la famille des vents pose également de nombreuses questions. Une étude a par exemple mêlé les aspects de contrôle hydrodynamiques et aéroacoustiques directement appliqués à l'instrument par le musicien, et l'étude des mécanismes respiratoires mis en œuvre par un flûtiste en situation de jeu [Cossette et al. 2010]. Il en a résulté que les premiers paramètres de contrôle soulignent la structure mélodique du morceau joué, sans corrélation avec le travail pulmonaire, soulignant ainsi le niveau d'expertise nécessaire à l'instrumentiste.

Finalement, le cas des instruments auto-oscillants a été traité par le biais des techniques de jeu et de production sonore et, dans une moindre mesure, par celui de l'ensemble des mou-

vements non directement producteurs de son. Les apports de ces mouvements, notamment du balancement du corps ou de la flexion des genoux, ont été examinés dans le cas de la trompette [Bejjani and Halpern 1989] ou encore de la clarinette [Wanderley et al. 2005].

Le cadre des instruments à oscillations libres a, à l'inverse, été légitimement le fruit d'études portant plus particulièrement sur les mouvements préparatoires que sur le geste producteur en lui même. Les gestes de percussions ont ainsi été analysés en détail indiquant entre autres une relation entre la vitesse de l'impact et le niveau sonore produit [Dahl 2004]. Leur modélisation, fondée sur des considérations expérimentales, a également fait l'objet d'un important travail [Bouënard 2009]. De même, le cas du piano a été souvent étudié, depuis de nombreuses années, à la fois quant aux techniques de jeu impliquées [Ortmann 1929; Parncutt et al. 1997], mais aussi aux moyens expressifs mis en œuvre par l'instrumentiste [Poggi 2006].

Cependant, le cas particulier des instruments à cordes pincées a été très peu considéré, certainement du fait de la présumée simplicité du pincement. Celui-ci est en effet usuellement considéré comme *idéal*, c'est-à-dire consistant en un pincement ponctuel de la corde, limitant schématiquement le contrôle de l'instrumentiste à la note jouée et à la position à laquelle le pincement est effectué sur la corde. Cette représentation a été particulièrement utilisée dans le cadre de la simulation de guitare classique, par des modèles physiques [Woodhouse 2004a; Bradley et al. 1995].

Néanmoins, écouter un néophyte et un musicien expert pinçant une même corde, à vide et à la même position, suffit à se convaincre qu'une part importante de la signature sonore prend forme dans le geste préparatoire. De même, nombreux sont les musiciens à cordes pincées qui revendiquent leur particularité sonore, ou encore être en mesure de reconnaître l'interprète d'un morceau à quelques notes, abstraction faite de la composante expressive véhiculée. La question de l'interaction entre le musicien et son instrument dans le cas des instruments à cordes pincées s'avère donc pertinente et ne pas se résoudre si simplement qu'usuellement admis. Ainsi, la prise en considération de la présence d'un instrumentiste, en l'occurrence un guitariste, en amont de la corde a été introduite dans quelques études [Derveaux et al. 2003; Pavlidou 1997; Evangelista 2010; Cuzzucoli and Lombardo 1999]. Ajoutant la présence d'une composante de vitesse à la corde à l'instant de son lâcher, et non plus simplement un déplacement de sa position au repos, une proposition de modèle de pincement a consisté en une distribution d'effort sur une largeur finie de la corde au cours d'une phase de tirer de la corde de 15ms et d'une phase de glissement de celle-ci sur le doigt du guitariste de 0.4ms [Derveaux et al. 2003]. Une avancée dans la compréhension du phénomène de pincement a été de ne plus seulement considérer la corde et l'état dans lequel le musicien l'amène, mais l'interaction entre le doigt et la corde avant les oscillations libres de celle-ci. Une modélisation analytique du pincement a ainsi été proposée au cours de plusieurs études [Pavlidou 1997; Evangelista 2010; Cuzzucoli and Lombardo 1999]. Les limitations majeures de ces dernières étant un manque de réalisme dans la modélisation du comportement visco-élastique du doigt, ainsi que dans l'estimation des paramètres mécaniques régissant le déroulement de l'interaction. Au cours de travaux récents quant à la vibro-acoustique

de la harpe de concert [Le Carrou 2006; Le Carrou et al. 2007b 2008], l'excitation des cordes de harpe a été abordée. Ces études ont essayé de remédier à ce problème en estimant ces paramètres par le biais de mesures du pincement. Ces études ont permis de mettre en lumière la difficulté du problème inverse ainsi constitué. L'originalité de ce travail a été d'utiliser une méthode expérimentale de capture du mouvement liée au pincement afin de déterminer les paramètres gouvernant le modèle mécanique d'interaction. Principalement, la complexité de l'action a été mise en avant, en justifiant une plus ample analyse.

1.3 Positionnement de l'étude

Le travail présenté dans le présent manuscrit s'attache à traiter de la question de l'interaction entre le musicien et son instrument en situation de jeu, dont émane la problématique du contrôle instrumental. Plus précisément, le choix a été fait de ne s'attacher qu'au groupe des instruments à oscillations libres, et en particulier à la harpe de concert. La réalisation de ce travail a nécessité de rassembler les compétences et les outils scientifiques disponibles et pertinents afin de rendre compte au mieux des gestes experts que sont les gestes musicaux, tant au niveau expérimental que théorique.

L'angle sous lequel ce travail est abordé place le musicien plutôt que l'instrument au centre de l'étude. Cette thématique s'inscrit dans la continuité des travaux de recherche menés au sein de l'équipe LAM (Lutheries-Acoustique-Musique) de l'Institut Jean Le Rond d'Alembert (UMR CNRS 7190) où a été accueillie cette thèse. En effet, c'est à l'interface entre les sciences dures et plus précisément l'acoustique, la mécanique et le traitement du signal, et l'étude de l'humain par le biais notamment de la linguistique et de la psychologie que s'opèrent la plupart des travaux de recherche de l'équipe. Ainsi, malgré le regain récent d'études portant sur les instruments à cordes pincées, et notamment sur la harpe de concert, la problématique de l'interaction entre le musicien et son instrument et du contrôle gestuel qu'ils appliquent en situation de jeu n'y ont que peu été abordée. En cela, cette thèse ouvre un champ de perspectives novateurs au sein de l'équipe de recherche.

Chapitre 2

La harpe de concert

La harpe de concert est un instrument qui, jusqu'à récemment, n'a été l'objet que de peu d'études dans le domaine de l'acoustique musicale. Elles ont été initiées en 1977 et 1987 à l'Université de St. Andrews en Ecosse par deux études au sujet respectivement d'une harpe d'Ecosse et d'une harpe de concert [Firth 1977; Bell 1987]. La première étude, à caractère expérimental, traite de la physique de l'instrument en général alors que la seconde se concentre sur le comportement vibratoire de la table d'harmonie. Par la suite, la vibro-acoustique de l'instrument a été détaillée lors de travaux effectués au LAUM (Université du Maine) et à l'Université British Columbia à Vancouver [Le Carrou 2006; Daltrop et al. 2010]. Leurs principaux apports ont consisté en l'étude du couplage entre les modes basses fréquences de la caisse et la table d'harmonie [Le Carrou 2006; Le Carrou et al. 2007a], en celle du phénomène de vibration des cordes par sympathie — problématique très importante dans le domaine de la harpe — [Le Carrou et al. 2009], et enfin en l'analyse du rayonnement de l'instrument [Le Carrou et al. 2010]. Un trait commun à toutes ces études est que le harpiste n'y est que très rarement inclus. Il est effectivement uniquement présent pour exciter les cordes de manière réaliste ainsi que pour étudier son influence sur le rayonnement de l'instrument [Le Carrou et al. 2009 2010].

2.1 Présentation de l'instrument

Le propos de la présente étude n'étant pas organologique, la présentation faite ici de la harpe de concert n'est pas exhaustive mais vise à la replacer dans son contexte historique. De la harpe arquée au III^e millénaire avant Jesus-Christ jusqu'à la harpe midi en 2011, cet instrument a en effet fait l'objet de nombreux développements, introduisant notamment une robustesse de la structure clairement liée à une évolution de la tension des cordes. Celle-ci a directement influé sur les techniques de jeu employées par les instrumentistes. Les informations suivantes quant à l'évolution de l'instrument et des techniques de jeu sont principalement issues de [Le Carrou 2006] [Griffiths and Rimmer 2001], [Rensch 1969] et de [Emmanuel 1990].

De par la nécessité d'augmenter le nombre de cordes que portait la harpe arquée afin d'en étendre les capacités musicales, la harpe angulaire est apparue au II^e millénaire avant Jesus-

Christ avec une structure en conséquence plus résistante. Les cordes étaient alors jouées à la main droite à l'aide d'un plectre élançé, la main gauche ne servant qu'à étouffer les cordes non jouées. Cette forme de harpe se trouve encore aujourd'hui en Afrique centrale et de l'ouest, où les cordes peuvent être de matériaux variés (cuir, fibre, boyau de chameau, tendon de jambe de girafe,...).

A l'époque médiévale, les cordes étaient majoritairement en cuivre, pincées voire frappées à l'aide des ongles. C'est à cette même période que l'instrument adopte sa forme dite moderne : triangulaire, augmentée d'une colonne reliant la console de l'instrument à sa caisse de résonance ; il s'agit de l'apparition des harpes écossaises et irlandaises. Le nombre de cordes que la harpe portait jusqu'à lors se trouve de nouveau augmenté, pouvant atteindre une cinquantaine, allant du boyau au métal. Les deux mains de l'instrumentiste sont désormais impliquées dans l'excitation des cordes : la main gauche joue les notes aiguës pendant que la main droite est réservée aux notes les plus graves, à l'inverse de la technique classique d'aujourd'hui. D'autre part, afin de reproduire les ornements typiques de la musique irlandaise, le musicien n'avait d'autre choix que de jouer les cordes avec des ongles affutés [Griffiths and Rimmer 2001].

Plus tard, à la Renaissance, les cordes étaient faites en crin de cheval et jouées avec la pulpe des doigts. La technique de jeu classique encore adoptée aujourd'hui, illustrée figures 2.1 et 2.2, est apparue à cette période, revendiquant qu'il faut placer la main sur les cordes de manière telle que pour brandir un étendard, impliquant de maintenir le pouce parallèle aux cordes.

A quelques exceptions près (harpe chromatique ou à plusieurs rangées de cordes), il s'agit d'un instrument diatonique jusqu'à l'invention du mécanisme dit à simple mouvement, développé entre la seconde moitié du XVII^e siècle et la première moitié du XVIII^e siècle. Il s'agit de la mise en place de crochets permettant de réduire la longueur vibrante des cordes, soit la fréquence fondamentale de chacune. Ces crochets étaient alors positionnés à la main gauche en cours de jeu, altérant l'aisance et la disponibilité de celle-ci pour jouer. C'est pourquoi, sous l'impulsion de musiciens, une amélioration a été l'introduction d'un système de pédales régissant le mouvement des crochets, laissant ainsi les deux mains du musicien libres de pincer les cordes [Emmanuel 1990].

L'instrument sera ensuite perfectionné par le célèbre facteur de piano et de clavecin Sébastien Erard sous de nombreux aspects tels que le remplacement des crochets par le complexe mécanisme de fourchettes que connaît l'instrument actuellement, ou encore par le renforcement de sa structure. Il introduit finalement la harpe à double mouvement au début du XIX^e siècle, permettant de jouer toutes les tonalités en attribuant à chaque note son altération par l'intermédiaire des 7 pédales de l'instrument. Celui-ci possède alors 45 cordes [Le Carrou 2006].

A cette même période, la technique de jeu classique n'implique que quatre doigts à chaque main, l'auriculaire n'étant pas utilisé du fait de sa faiblesse relativement aux autres. Stéphanie Félicité, comtesse de Genlis a cherché à appliquer à la harpe des techniques propres aux instruments à claviers afin d'en élargir le répertoire. Pour ce faire, elle a proposé l'emploi des dix doigts, notamment dans *Nouvelle méthode pour la harpe*, paru en 1802 [Félicité Comtesse de Genlis 1802]. Cependant, cette méthode n'a été adoptée que par ses propres élèves.

Les techniques de jeu se sont finalement complexifiées au cours du XIX^e siècle avec l'utilisa-

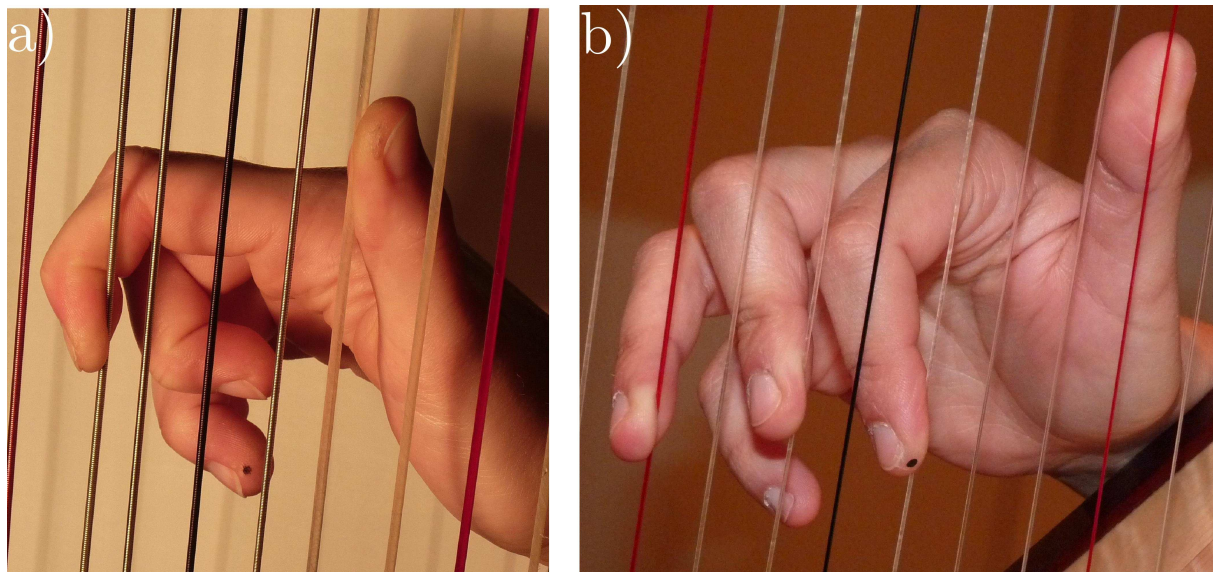


FIGURE 2.1 – Exemples de positionnement de la main droite sur les cordes de harpe pour jouer une séquence d'arpèges. a) Vue de face et b) vue de trois quart.

tion grandissante de la harpe dans l'écriture de l'époque. En effet, son rôle se limitait jusqu'ici à quelques gammes, accords et arpèges, parfois associés à quelques ornements tels que trille ou *gruppetto* [Griffiths and Rimmer 2001]. Les spécificités majeures de l'instrument étaient alors le jeu d'harmoniques et les techniques d'étouffement des cordes, toutes deux régies par la main gauche. La stabilisation de la mécanique et de l'instrument ainsi que la volonté de quelques compositeurs ont contribué à faire évoluer la place de l'instrument dans le répertoire de l'époque. La harpe fait finalement son apparition dans l'orchestre moderne dans la seconde moitié du siècle par le biais de l'opéra.

Jusqu'à nos jours, peu d'évolutions sont à noter en dehors de l'ergonomie de l'instrument qui a été travaillée, notamment par la société Camac Harps¹. Néanmoins, comme nombre d'instruments, le registre de la harpe a pu évoluer au cours du XX^e siècle par l'association de nouvelles technologies à sa structure classique. Ainsi, les harpes électro-acoustiques sont apparues dans la seconde moitié du siècle. Différents modèles à pédales ou celtiques existent aujourd'hui, de la *Blue harp* de Camac Harps aux modèles *Echo* et *Egan* de Salvi², ou encore la *Style 2000 Electroacoustic* de Lyon & Healy³. Enfin, la première harpe midi développée par Camac Harps a fait son apparition au début du XXI^e siècle, ouvrant un nouveau champ de possibilités pour le répertoire de la harpe et la création musicale.

Au cours du travail présenté dans ce manuscrit, la harpe de concert utilisée a été une harpe Camac Harps, Atlantide modèle Prestige. Elle comporte 47 cordes, numérotées de 00 à 45, définissant une tessiture allant de 31Hz à 2960Hz, soit du Dob^{-1} au Solb^6 . Le cordage utilisé est

1. Camac Harps, La Richerais - BP 15 - 44850 Mouzeil - France, www.camac-harps.com/

2. Salvi Harps, Piasco Province de Coni - Italie, www.salviharps.it/

3. Lyon & Healy Harps, Inc. 168 North Ogden Avenue Chicago, IL 60607-1465 U.S.A., www.lyonhealy.com

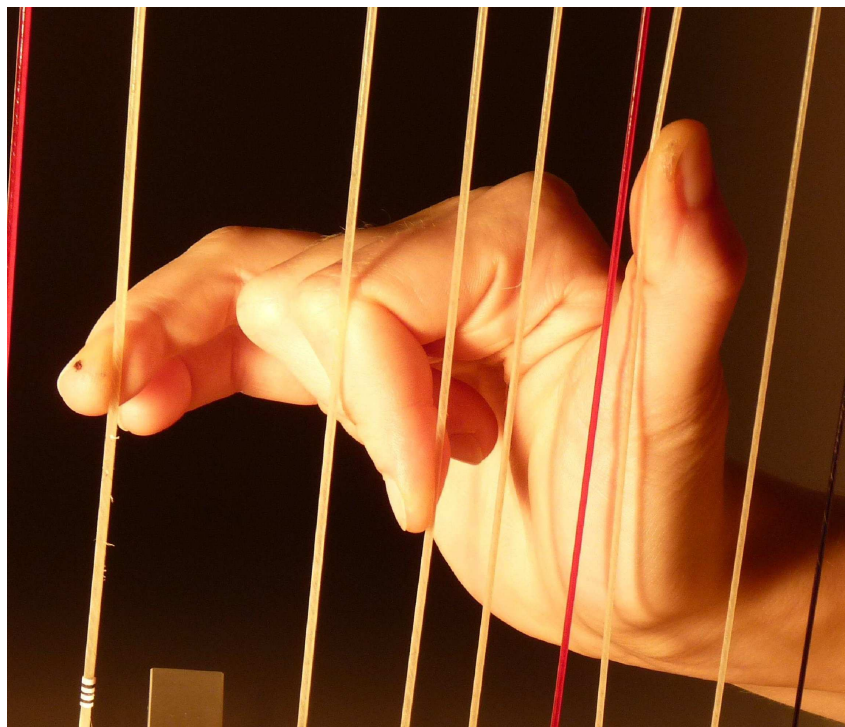


FIGURE 2.2 – Exemple de positionnement de la main droite sur les cordes de harpe pour jouer un accord. Pour les besoins de l'expérience, une corde a dû être retirée.

constitué de cordes en nylon (numéros 00 à 6), en boyau (numéros 7 à 33) et en acier filé (numéros 34 à 45). Les tensions des cordes de l'instrument sont réparties de 45N à 756N et totalisent une charge d'environ 11500N appliquée à la table d'harmonie. D'autre part, l'instrument pèse environ 35kg pour une hauteur de 1m86. La harpe est présentée figure 2.3 où ses principaux éléments de lutherie sont également indiqués. Ne nous pré-occupant pas directement des détails de la facture de l'instrument au cours de notre étude, nous ne précisons pas plus amplement ce paragraphe. Le lecteur peut cependant se référer au travail de thèse [Le Carrou 2006] pour de plus amples explications quant à la facture de l'instrument.

2.2 Posture du harpiste

Theore Labarre, auteur de *Méthode complète* en 1844 indique les techniques attendues d'un bon interprète, prônant notamment les harmoniques et les glissés, en codifiant l'exécution. Par exemple, alors que jusqu'à trois harmoniques peuvent être exécutées simultanément à la main gauche, une seule peut être jouée à la fois à la main droite. De même, le glissé doit être effectué au pouce en descendant des notes aiguës vers les graves, alors que la remontée s'exerce soit avec l'index seul, soit avec le majeur et l'annulaire ensemble [Griffiths and Rimmer 2001].

Le document le plus complet que nous ayons retrouvé détaillant la posture que le harpiste classique doit adopter est issu de [Rensch 1969]. Explicitant à la fois la posture du musicien, son assise, mais aussi le positionnement des mains, ce texte souligne la spécificité et l'importance de

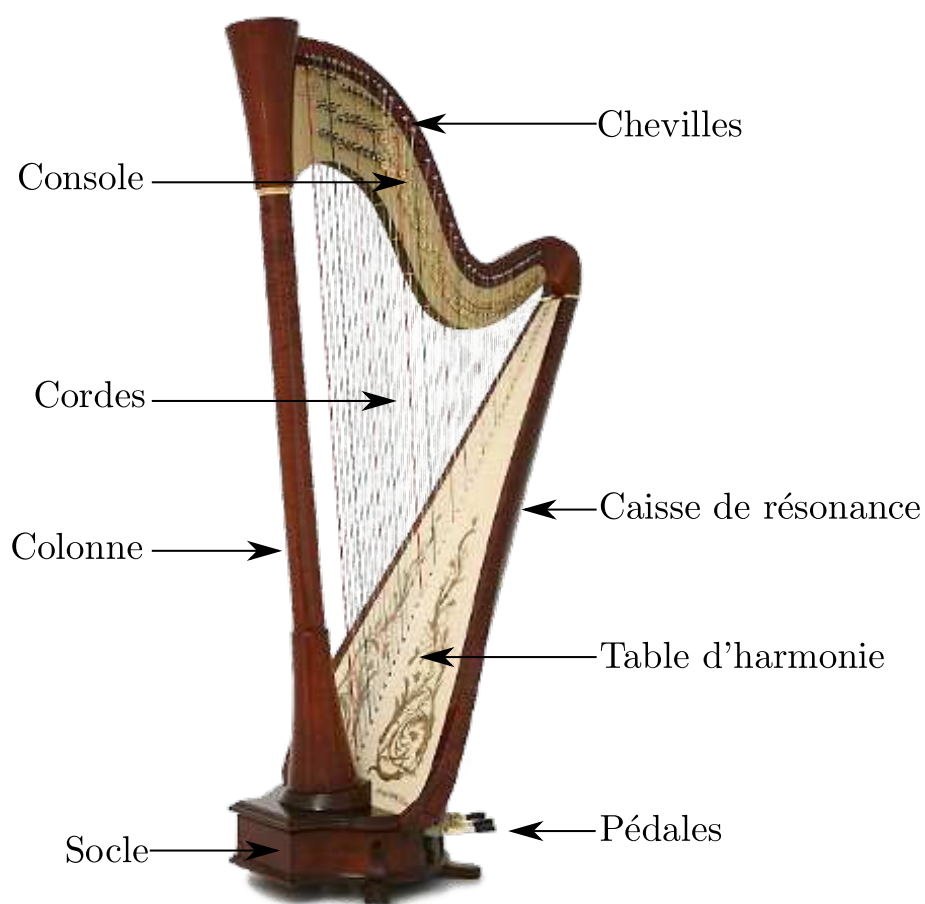
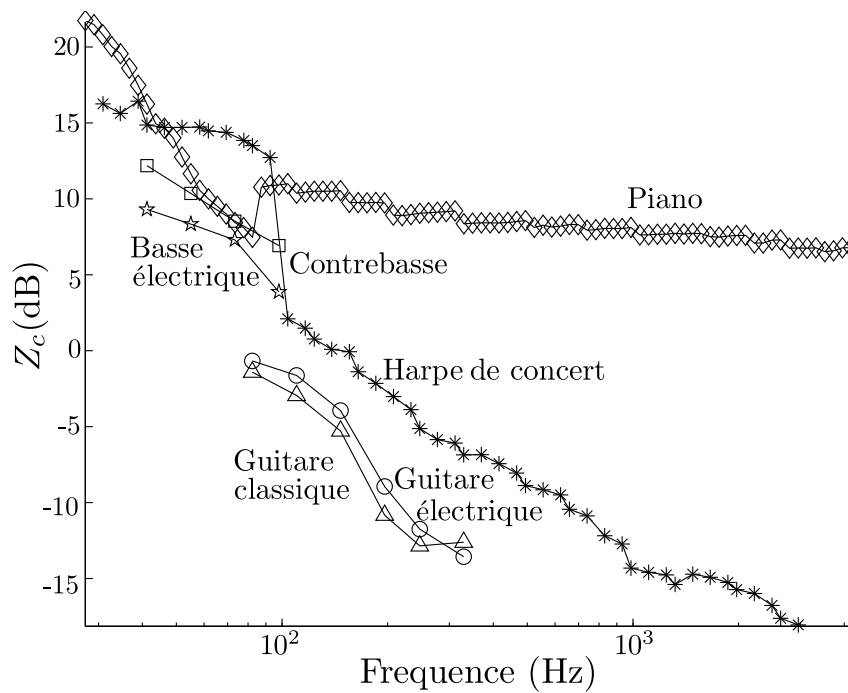
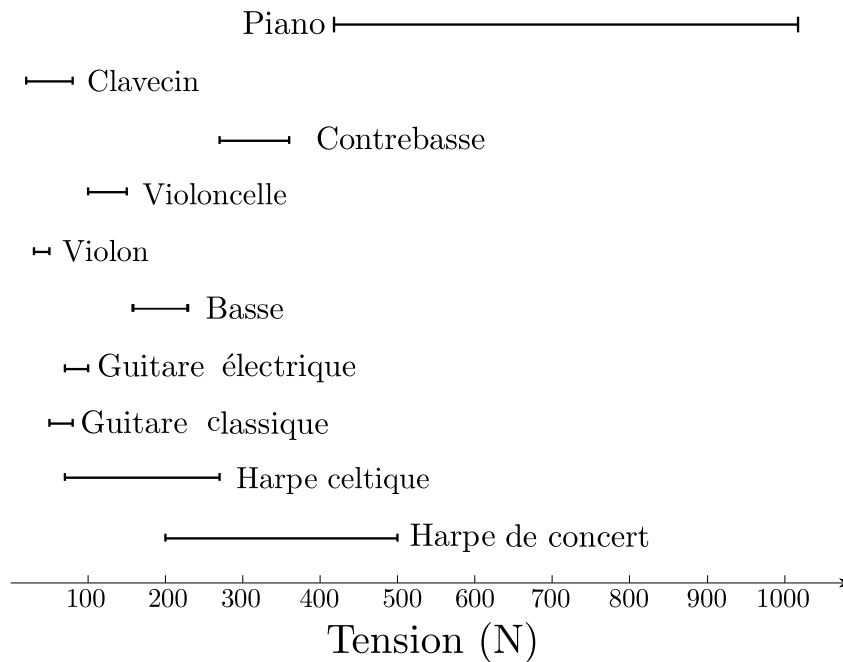


FIGURE 2.3 – Harpe de concert Camac Harps, Atlantide modèle Prestige, utilisée au cours de ce travail. Photo de l'instrument extraite de www.camac-harps.com



(a) Impédance caractéristique en fonction de la fréquence fondamentale. La référence à 0dB est prise égale à l'impédance caractéristique de la 30^e corde de harpe étudiée au long de ce manuscrit. $Z_c^{ref} = 0.80 \text{ kg/s}$.



(b) Tension

FIGURE 2.4 – Caractéristiques des cordes de quelques instruments à cordes.

l'interaction entre le harpiste et son instrument :

« While the exact position of the player at the pedal harp must be established by the individual harp instructor a few general remarks may be helpful. The beginner and student should be encouraged to maintain a correct position at the harp at all times.

The harp, when in use, rests on the right shoulder and inner side of the knees of the player. The instrument is inclined towards the player to such an extent that only its two rear feet remain on the ground. The height of the chair or bench used by the harpist should correspond to the proportions of the harpist and the size of the harp. Beginners are cautioned against sitting either too close or too far from the harp. The music stand, adjusted to a convenient height, should be placed to the left of the within easy reach of the harpist's left hand.

The harpist should sit in an erect position on a firm, armless chair or on a bench. The body must be neither too tense nor too relaxed. The harpist's feet when not in use should remain flat on the floor (never hooked around the chair legs). The position of the harpist's hand is a curved one. (The hand should bend at the finger joints.) Except for special effects the strings are plucked approximately at a midway point ; with the fingers of the left hand playing slightly lower on the strings than the fingers of the right hand.

Only the thumb, the index finger, the middle finger, and the ring finger of either hand are used in playing the modern pedal harp, the fifth or little finger being considered too short for practical use. In marking the fingering of harp music the thumb is I (in early printed music a plus sign was often used for the thumb); the index finger is 2; the middle finger is 3; the ring finger is 4. Except for certain special effects the strings are usually plucked with the fleshy tips of the fingers. Fingernails should be kept short. (Fingernails that are too long not only interfere with good tone production but may also make gouge marks on the sound board surface.)

Most methods of instruction prefer to have the harpist's thumb placed in a relatively upright position on the strings; strings are thus plucked by the sides rather than the centre tips of the thumbs. At all times careful attention must be paid to the placing of the fingers. Beginners, if not carefully observed, frequently underestimate the importance of the hand position and finger placement. This negligence may result in a poor hand position which hampers tone production, and which must *unlearned* rather than adjusted. The beginner (especially older beginners with technical facility on other musical instruments) must not be allowed to snatch at the harp strings or to grab haphazardly, letting the fingers strike anywhere just to produce a sound. The technique of the harp is a specific one, and it is only through careful and diligent practice with a trained instructor that this technique can be adequately comprehended and developed.

The position of the harpist's arms varies from an absolutely horizontal one to one of moderately raised elbows, according to the preferred method of the instructor. The

right side of the sound board ; except for special effects the left arm should not touch the sound board. At no time should the student be permitted to *lean* on the sound board while playing. (*Wrists in* but *elbows out* is a good basic rule to follow.) »

Les échanges informels eu avec différents professeurs de harpe ont confirmé l'importance de la posture adoptée, à la fois du point de vue de l'envergure des possibilités de jeu, mais aussi du confort physique de l'instrumentiste. Globalement, les traits principaux décrits ci-dessus sont toujours d'actualité dans l'enseignement de la harpe. Cependant, il est à noter que différentes écoles co-existent, principalement quant à la prise des cordes par les doigts. La première phalange peut en effet être soit tendue soit appuyée sur les cordes, impliquant des variations dans *la profondeur et l'articulation* du son. Ces deux approches sont directement liées à l'anticipation du geste, une préparation plus importante étant nécessaire dans le cas où le doigt vient s'appuyer et travailler la corde que dans le cas contraire. De même, la question de la tenue des pouces, levés ou au contraire baissés par rapport au reste de la main, apparaît primordiale dans la technique de jeu, ainsi qu'en regard des douleurs éventuellement générées par la posture globale qu'elle implique [Martin 2011].

2.3 Discussion

Le choix de concentrer la présente étude sur la harpe de concert est ainsi motivé par plusieurs raisons. En comparaison à d'autres instruments, la place de l'instrumentiste a très peu été étudiée dans le cas de la harpe. Néanmoins, la spécificité et la complexité de son jeu sont clairement mis en lumière par l'ergonomie de l'interaction avec l'instrument ainsi que par les premières études expérimentales du pincement d'une corde de harpe [Le Carrou et al. 2007b 2008]. Il résulte de ces premiers éléments une interrogation quant à la facilité d'exercer un contrôle précis de l'excitation des cordes de harpe.

Dans le but de la quantifier vis-à-vis des autres instruments de la famille des cordes, la figure 2.4-a) présente une cartographie des impédances caractéristiques de cordes estimées pour quelques instruments, disponibles dans l'équipe LAM, en fonction de leur fréquence fondamentale f_0 . Elles ont été calculées suivant la relation

$$Z_c = \sqrt{T\rho_l}, \quad (2.1)$$

$$= 2Lf_0\rho_l, \quad (2.2)$$

où ρ_l est la masse linéique de la corde, et T sa tension calculée classiquement à partir de sa longueur L et de sa fréquence fondamentale f_0 en faisant l'hypothèse de conditions aux limites fixes et de corde souple. Cette figure est révélatrice de la position singulière de la harpe parmi les instruments à cordes. En effet, elle se situe à la frontière entre les instruments à corde mis en vibration par le doigt humain, et ceux où un outillage devient nécessaire, tel qu'un marteau pour exciter les cordes de piano. De même, la figure 2.4-b) expose les gammes de tension des instruments à cordes. Un plus grand nombre d'instruments est présenté il s'agit de valeurs théoriques obtenues dans la littérature [Le Carrou 2006; Leipp 2011]. Les tensions observables

sur une harpe de concert peuvent être très élevées en comparaison aux autres instruments de la même famille. Or, la combinaison entre la tension et le point auquel le pincement s'effectue va définir l'effort que le musicien devra produire pour jouer la corde. Pour la majorité des instruments à corde, la technique de jeu usuelle implique une excitation de la corde entre le huitième et le douzième de sa longueur, souvent dans le but de générer un spectre sonore riche. Si certains modes de jeu standards de la harpe de concert impliquent de pincer la corde, avec l'ongle ou la pulpe du doigt, près de la table d'harmonie, il n'en demeure pas moins que les cordes de harpe sont le plus communément pincées entre le tiers et la moitié de leur longueur du fait de leur tension élevée. Ces éléments viennent donc conforter la notion de complexité du pincement à la harpe, mais également susciter de nombreuses interrogations quant aux stratégies gestuelles, de manière globale et non plus seulement restreinte au pincement, mises en œuvres par le harpiste afin de contrôler sa production sonore.

Chapitre 3

Enjeux scientifiques

3.1 Intérêts de l'étude

Les intérêts d'une telle étude sont multiples. Tout d'abord, du point de vue du harpiste, des apports tant au niveau de la pédagogie que de la technique de jeu sont envisageables. Concernant la pédagogie, il s'agit d'apporter des compléments illustratifs et objectifs à l'expertise du musicien, en particulier par la mise en relation de traits gestuels et d'attributs sonores. D'autre part, l'optimisation de la posture du musicien, par rapport à son instrument mais aussi en lien avec le contexte musical sera intéressant afin de prévenir certaines douleurs et de minimiser les efforts produits inutilement.

Le questionnement de l'ergonomie de l'interaction entre le musicien et son instrument touche aussi de près des problématiques de facture. En effet, cela amène à réfléchir quant aux possibles adaptations de la forme de l'instrument, notamment ici de la caisse de résonance, mais aussi des matériaux engagés dans sa fabrication. Le choix des cordes est particulièrement ardu car il influe à la fois les qualités sonores et la jouabilité de l'instrument, deux notions à la fois complexes à définir et propres à chaque musicien sur un instrument donné.

Enfin, du point de vue scientifique, outre une compréhension plus fine des phénomènes mécaniques complexes d'interaction entre le harpiste et son instrument, un intérêt de ce travail se situe au niveau des synthèses sonores d'instruments de musique. La plupart de ceux-ci ont désormais été suffisamment étudiés sur le plan de leur fonctionnement mécanique pour qu'ils puissent être finement décrits par des modèles physiques [Rhaouti et al. 1999; Derveaux et al. 2003; Chabassier 2012]. Ces derniers travaux sont cependant ardu à utiliser en synthèse sonore du fait de leur complexité de calcul. D'autres approches, plus adaptées à cette application, sont fondées sur diverses méthodologies (différences finies [Bilbao 2009], guides d'ondes numériques [Smith III 2008], synthèse modale, synthèse par réseaux de systèmes physiques élémentaires [Cadoz 1979],...) dont sont issues de nombreuses plateformes dédiées à la synthèse sonore. Celles-ci se trouvent dans des contextes à caractères principalement académique telles que *Modalys* développé par l'équipe Acoustique instrumentale de l'Ircam ou le langage *Cordis-Anima* développé à l'ACROE, ou à portée commerciale comme, par exemple, les synthétiseurs modulaires développés par la société *Applied Acoustics*. Dans tous les cas, la gestion du contrôle de cette synthèse sonore

apparaît comme une étape clef, à laquelle de nombreux recours sont proposés. Par exemple, la définition de *preset*, c'est-à-dire la programmation de configurations des paramètres régissant la synthèse sonore d'un instrument, est au centre du développement de ces dernières. De plus, le contexte temps-réel (*Méta-instrument* [de Laubier et al. 2012], ensemble *Chorus-digitalis* [Feugère and D'Alessandro 2012],...), non plus nécessairement issu de modèles physiques, associe à la problématique de la synthèse sonore celle de sa correspondance avec le geste capté (*mapping*) [Verfaille et al. 2006; Caramiaux 2012]. Ainsi, un jeu de paramètres mécaniques définissant le système, au commencement de sa vibration, pour un contexte musical donné, serait une contribution intéressante aux techniques de contrôle des synthèses sonores.

3.2 Problématiques et contributions

L'analyse et la modélisation de l'interaction entre le musicien et son instrument dans le cas de la harpe nécessite d'apporter des éléments de réponses aux problématiques résumées ci-dessous.

- *Quelles sont les stratégies gestuelles mises en place par un harpiste lors de l'interprétation d'une œuvre ?* Il s'agit d'apporter une compréhension des mouvements du musicien qui ne sont pas uniquement liés à la production sonore. Pour ce faire, nous proposons une analyse expérimentale de ces stratégies gestuelles en regard du contexte musical. Leurs caractéristiques d'une part, mais aussi leurs intérêts relativement à l'exécution du morceau sont mis en avant.
- *En quelles proportions le contrôle du harpiste est-il audible dans son interaction avec l'instrument, réduite au pincement de la corde ?* Il s'agit de mettre en exergue la complexité et la signification de l'action de pincer une corde, a priori, très simple. Pour ce faire, nous proposons un jeu de descripteurs du pincement fondés sur des considérations purement expérimentales. La spécificité et la répétabilité de cette action avec la technique de jeu ont été montrées, et des ordres de grandeurs typiques décrivant sa cinématique proposés.
- *Quels attributs du pincement sont nécessaires et suffisants afin de le reproduire fidèlement ?* Il s'agit de proposer un outil parfaitement répétable et configurable en mesure de pincer les cordes à l'image d'un vrai musicien. Pour ce faire, un doigt artificiel est mis en place dont les performances sont évaluées par le biais d'une comparaison avec le pincement d'un véritable harpiste.
- *Est-ce que l'interaction entre le doigt et la corde de harpe dans un contexte musical donné peut être caractérisée par un jeu de paramètres mécaniques ?* Il s'agit de proposer une modélisation mécanique du pincement utile à mettre en lumière les paramètres jouant un rôle critique vis-à-vis de la production sonore. Pour ce faire un modèle analytique est introduit, dont les paramètres sont estimés grâce à des pincements mesurés. L'impact et

la spécificité de ces paramètres en regard du contexte musical sont examinés.

3.3 Organisation du manuscrit

La démarche adoptée est présentée dans ce manuscrit sous la forme de quatre parties, formant un ensemble de sept chapitres. Chacune des deux parties centrales étant composée d'articles publiés ou soumis à publication dans des revues scientifiques, des *avant-propos* sont proposés afin d'aider à leur insertion au sein de la globalité du manuscrit.

La seconde partie s'attache à étudier la question des stratégies gestuelles du harpiste en situation de jeu. Pour cela, cette partie s'articule autour de deux chapitres à forte composante expérimentale. Deux échelles de l'interaction entre le musicien et son instrument sont retenues et étudiées ici : l'échelle globale comprenant tant la posture du harpiste par rapport à son instrument que les gestes de son bras lors de la production d'une note au chapitre 4, mais également celle, plus fine, du pincement de la corde lors du chapitre 5. Ces analyses ont toutes deux nécessité la mise en oeuvre de méthodes expérimentales fines afin d'étudier le contrôle gestuel du musicien dans un contexte réaliste et d'en décrire les traits fondamentaux.

La troisième partie du présent document relate le pendant "modélisation" du travail effectué. Il s'agit en effet de valider et de mettre en exergue les limitations des connaissances issues de la partie précédente quant au contrôle gestuel du harpiste lors de l'interprétation d'une pièce. Deux points de vue sont pour cela adoptés respectivement aux chapitres 6 et 7. Le premier traite de la mise en place d'un doigt artificiel destiné à pincer les cordes tel un véritable musicien. Les pincements effectués sont ensuite comparés aux signaux obtenus dans le cas de pincements par un vrai harpiste, validant ou non la pertinence du pincement robotisé. Le second chapitre de cette partie propose pour sa part une modélisation physique du pincement. Celle-ci a pour but de mettre en lumière les paramètres mécaniques déterminants dans la production d'une note ainsi que la mesure de leur influence sur les attributs acoustiques et perceptifs du son. Notre compréhension du pincement étant ainsi décrite mécaniquement, sa validité sera directement estimée par le biais de celle du modèle.

Enfin, la quatrième et dernière partie proposée conclut ce document par un rappel des principaux résultats obtenus, ainsi que les limitations rencontrées. Les perspectives envisagées afin de poursuivre ces travaux et de traiter les pistes qu'ils ont ouvertes sont également présentées.

Deuxième partie

Etude expérimentale de l'interaction musicien/instrument

Avant-propos

Dans cette partie du manuscrit, nous traitons du déroulement de l'interaction entre le harpiste et son instrument sous un angle purement expérimental. Le terme d'interaction renvoie dans le cas présent à plusieurs niveaux de l'interprétation musicale. Tout d'abord, le pincement des cordes, action minimale requise pour jouer de la harpe, mais aussi l'ensemble des mouvements en amont et en aval de celui-ci, ayant pour but de faciliter le pincement et de favoriser la transmission d'une composante expressive à l'auditoire. Enfin, du fait du caractère imposant de l'instrument et de l'usage combiné des jambes et des bras dans la production sonore, la gestion de l'ergonomie globale du harpiste en regard de son instrument est très importante. Ainsi, il s'avère que le harpiste a à sa disposition de nombreux paramètres gestuels afin de régir son jeu. L'objectif de cette partie est de mettre en exergue et de quantifier ces paramètres de contrôle ainsi que leurs variations suivant les instrumentistes dans un contexte musical. Dans ce but, deux études expérimentales sont menées, l'une portant sur les stratégies gestuelles mises en place par le harpiste afin d'interpréter une œuvre musicale, et l'autre traitant de l'action de pincement à part entière. Notons que les protocoles de mesures présentés aux harpistes lors de chacune de ces deux expériences sont présentés à l'annexe A.1 de ce manuscrit.

Le chapitre 4 est présenté sous la forme de l'article *Gestural strategies in the harp performance*, soumis pour publication à la revue *Acta Acustica united with Acustica*. Il traite des stratégies gestuelles élaborées par le harpiste afin de répondre aux contraintes et objectifs musicaux nécessaires à l'interprétation d'une œuvre. Parmi eux, nous pouvons citer la mise en vibration adéquate de l'instrument, mais aussi la transmission d'une intention musicale à l'auditoire ou encore la communication avec d'autres musiciens. Une analyse des mouvements mis en œuvre par trois harpistes invités à jouer un extrait des *Danses* de Claude Debussy a été effectuée, corrélée à celle des signaux acoustiques mesurés simultanément. La figure 3.1 présente une photo prise lors de ces mesures. On y retrouve le harpiste dont la gestuelle est étudiée à partir d'un système de capture de mouvements. Les marqueurs réfléchissants en lumière infrarouge disposés sur le musicien ainsi que sur la harpe permettent de reconstruire son squelette image par image comme l'illustre le schéma associé. Les marqueurs ont été disposés suivant le modèle proposé annexe A.2. A partir de ces données cinématiques, des descripteurs dynamiques, à l'instar des efforts en jeu au niveau des articulations du musiciens sont estimés grâce à la méthode de la dynamique inverse [Winter 2009]. La définition de descripteurs gestuels et acoustiques a permis l'analyse de la posture et de la gestuelle du musicien en relation avec le contexte musi-

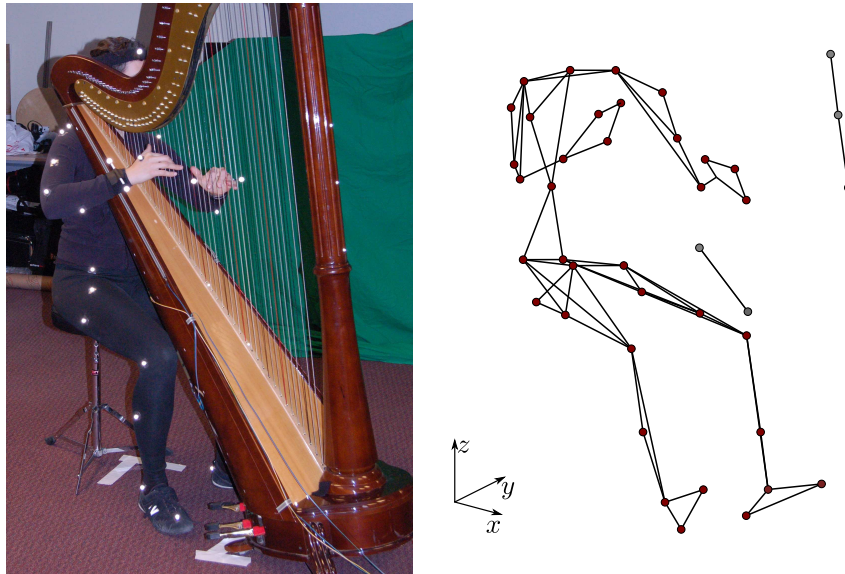


FIGURE 3.1 – Photographie d’un harpiste prise lors d’une séance de mesures consistant en la capture de ses mouvements au cours de l’exécution d’un morceau. Elle est associée à la schématisation des squelettes reconstruits du musicien (marqueurs rouges) et de l’instrument (marqueurs gris) en trois dimensions.

cal. Il apparaît dans un premier temps que la posture générale du harpiste par rapport à son instrument reste stable au cours de l’exécution du morceau. D’autre part, en restreignant le champ d’étude au bras du harpiste, dans un contexte de jeu d’accords, on montre que la gestion des efforts fournis s’effectue en amont, au niveau de l’épaule et non de la main. De plus, un résultat connu de l’expertise du mouvement humain, la spécificité et la répétabilité des gestes, est retrouvé ici. Par ailleurs, de plus amples détails quant à ce dernier résultat sont proposés annexe B. Enfin, la main, produisant les notes par le biais du pincement, s’avère être un élément clef dans la réalisation comme dans la perception de la structuration du morceau. Les aspects expérimentaux relatifs à cette étude ont été mis en place au sein du laboratoire IDMIL (Input Devices and Music Interaction Laboratory) en collaboration avec Marcelo Wanderley, professeur à l’Université de McGill à Montréal, Canada.

Le pincement de la corde est l’aboutissement des gestes experts amonts. Il va définir les caractéristiques des oscillations libres de la corde, c’est-à-dire les qualités sonores de la note produite. Le chapitre 5, qui est également proposé sous la forme d’un article publié dans le *Journal of the Acoustical Society of America* [J. Acoust. Soc. Am. 131, 844-855 (2012)], présente une description de l’interaction entre le doigt et la corde de harpe en conditions de jeu réalistes. Cette étude a consisté en la mesure des trajectoires du doigt et de la corde lors du pincement, illustrée par la figure 3.3. Ces mesures se sont déroulées sur des pincements extraits de séquences d’arpèges ou d’accords, comme l’illustre le protocole figure 3.2, les notes représentées en rouge étant celles effectivement analysées. Lors d’études précédentes quant au pincement d’une corde de guitare [Pavlidou 1997] ou de harpe [Le Carrou et al. 2007b 2008], il a été montré que cette

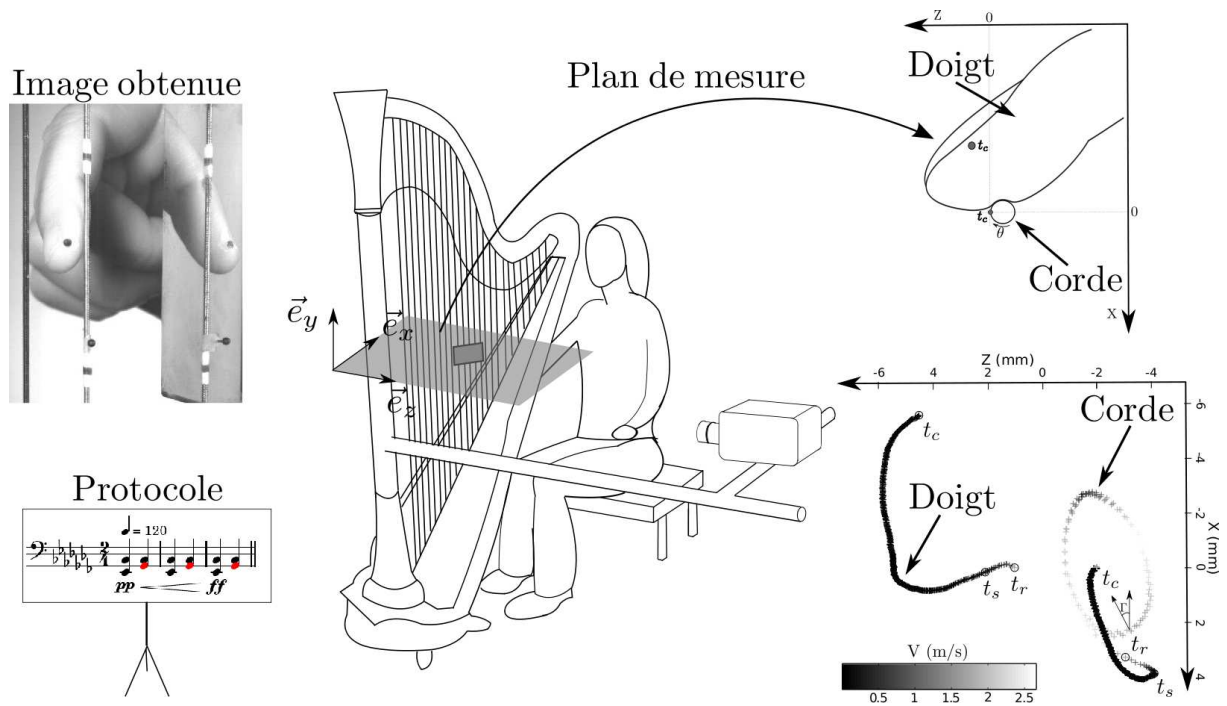


FIGURE 3.2 – Schématisation du protocole expérimental mis en place pour étudier le pincement d’une corde de harpe. Un image obtenue par le biais de la caméra rapide est présentée, ainsi qu’un couple de trajectoires du doigt et de la corde dans le plan d’étude.

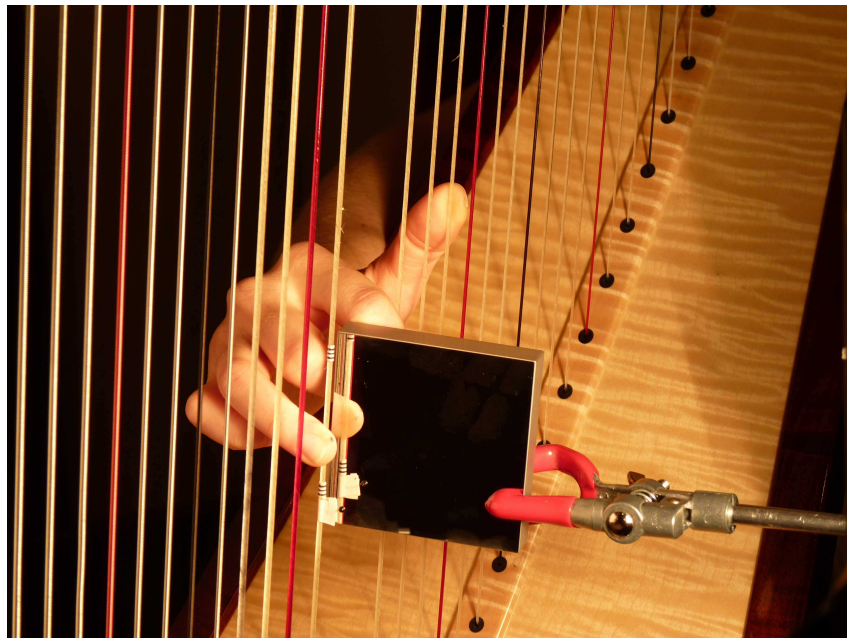


FIGURE 3.3 – Photographie prise pendant la capture du pincement d’une corde de harpe à l’aide d’une caméra rapide.

action se décompose en deux phases successives. L'accroche, tout d'abord, est la période pendant laquelle le doigt emmène la corde jusqu'à la position désirée. Ensuite, lors du glissement, la corde glisse sur le doigt, tous deux ayant des mouvements de directions opposées, jusqu'à quitter celui-ci et débiter sa phase de vibrations. On définit les instants t_c , t_s et t_r comme débuts respectifs de l'accroche, du glissement, et des oscillations libres de la corde. La brièveté du contact entre le doigt et la corde (au maximum 500ms) a nécessité l'usage d'une caméra rapide. En pratique, comme l'illustre le schéma central de la figure 3.2, cette dernière a été fixée à la harpe afin de permettre au musicien de basculer l'instrument contre son épaule et de jouer dans un contexte au plus proche de la réalité. Comme l'indique l'exemple d'image obtenue par la caméra présentée figure 3.2, des marqueurs ont été disposés à des positions stratégiques sur le doigt et la corde. Leurs mouvements au cours du temps ont ensuite été extraits par traitement d'images. L'analyse des incertitudes de mesures liées à cette extraction de trajectoires dans une série d'images issues de ce montage est détaillée au sein de l'annexe C du présent manuscrit. Cette étude permet de valider le protocole expérimental mis en place dans ce chapitre. Les déplacements respectifs du doigt et de la corde sont représentés dans le plan d'étude perpendiculaire aux cordes, voir la figure 3.2. Combinées à une mesure vibratoire effectuée sur la table d'harmonie, les cinématiques de la corde et du doigt permettent de définir un ensemble de descripteurs des conditions initiales des oscillations de la corde. Ceux-ci ont été estimés pour environ 150 pincements effectués par 10 harpistes à l'aide de l'index et de l'annulaire de la main droite dans des situations de jeu variées impliquant des séries d'accords et d'arpèges. Cette étude a permis de mettre en évidence la grande répétabilité du pincement effectué par un musicien, mais aussi sa spécificité en regard des autres instrumentistes. Ceci s'observe notamment par le biais des mouvements particulièrement complexes transmis à la corde, et des jeux de conditions initiales appliqués aux oscillations de la corde. Il est montré que celles-ci sont un complexe dosage entre déplacement, vitesse et rotation. Remarquons finalement que l'annexe D explicite la relation entre cette dernière et les vibrations de la corde. Il en résulte que la rotation du doigt autour de la corde semble consister plus particulièrement en un paramètre de contrôle du musicien sur le pincement qu'en un paramètre déterminant vis-à-vis de la sonorité produite.

Chapitre 4

Gestural strategies in the harp performance¹

Abstract

This paper describes an experimentally-based analysis of the interaction between a musician and her/his instrument, in the case of the classical concert harp. The aim of this study is to highlight gestural strategies set up by a harpist while performing a musical piece. As a result of years of practicing, a trained musician has developed the ability to deal with a number of trade-offs among simultaneous objectives while playing. She/he has obviously to set the instrument into vibration, but also to convey some musical intention to the audience and to communicate with other musicians, while keeping a safe posture with respect to articular and muscle pain. In order to precisely describe the motion strategies carried out by trained harpists, an experiment has been designed using a motion capture system, combined with classical video and audio recordings. This provides accurate three-dimensional positioning of several markers disposed on the harpist and on the harp, within the execution of a musical piece. From the acquired gestural and acoustical signals, a set of kinematic and dynamic descriptors has been extracted. The investigation shows that, while each musician uses her/his own specific and repeatable upper-limb movements, the global sound-producing gesture is mostly controlled by the shoulders. Besides, sound-facilitating hand gestures are highlighted for their supporting role to the musician throughout the musical piece.

1. D. Chadeaux, J.-L. Le Carrou, B. Fabre, M.M. Wanderley and L. Daudet, “Gestural strategies in the harp performance”, *Acta Acustica United with Acustica*. Soumis le 11 juillet 2012.

4.1 Introduction

Whatever the type of physical activity we focus on (sport, music, painting, ...), years of practice are required to deal with all the underlying subtleties necessary to become a skilled performer. At least 10 years of training [Williamon 2004], or 10000 hours [Ericsson et al. 1993], are considered to be necessary to become an expert in a particular discipline. At first, the learning mostly concerns the knowledge involved in a basic execution. For instance, at the beginning of tennis practicing, a novice will learn how to stoke the ball to set it into the opponent field, regardless of force and velocity. Once this action has become reflexive, further technical considerations will be taken into account for a good ball stroke. Exactly the same process appears while learning a musical instrument. We first learn to basically set the instrument into vibration. Then, when the ability to play notes regardless of the underlying process is gained, an entire set of musical objectives can be considered in order to enhance the performance, to convey the desired musical intention, and to play safely and efficiently.

For this purpose, several kind of gestures are involved into music performance. The classification of musical gesture proposed in [Jensenius et al. 2009] is adopted in the present paper. It is based on the functions of musical gestures during playing, as for instance *sound-producing*, *sound-facilitating*, *communicative* and *sound-accompanying* gestures. First of all, the *sound-producing gestures* are responsible for setting the instrument into vibration. They have been investigated in detail, e.g. with the use of mechanical devices for excitation, in order to provide information about the control parameters used by the musician while playing. This information is particularly important for realistic sound synthesis. For instance, excitation mechanisms for bowed string instruments have been investigated [Demoucron et al. 2009], through the force applied by the bow on violin strings. Other studies have investigated the plucking action in the concert harp [Chadefaux et al. 2012c] as initial conditions for string vibrations, or the respiratory and hydrodynamical phenomena occurring during flute playing [Cossette et al. 2010]. The relationship between these sound-producing gestures and the musical technique has also been investigated. Indeed, as early as 1929, Ortmann [Ortmann 1929] carried out an experimental study of the muscular action related to playing techniques in the piano. His results exhibit some relationships between the technical methods of performing and the musical content. More recently, movement strategies related to bowing techniques have been studied [Rasamimanana et al. 2006]. In the light of these results, it is possible to model the excitation mechanism of some instruments, such as the plucking action for the classical guitar [Pavlidou 1997; Evangelista 2010; Cuzzucoli and Lombardo 1999], or for the concert harp [Le Carrou et al. 2007b 2008]. Besides sound synthesis, *sound-producing gestures* analyses can be used to control virtual musicians [Bouënard et al. 2010].

The second class of gestures are the *sound-facilitating gestures* that support the *sound-producing gestures*, for instance to reach strings, as well as to set the *tempo* or to emphasize notes. In drumming, the preparatory gesture, through its amplitude and the striking velocity, appears to have a significant influence to achieve the desired dynamic level [Dahl 2004]. Body's motions support the underlying rhythmic structure within a score [Wanderley et al. 2005], in

some cases they also ease the performance of complex musical scores [Poggi 2006; Bejjani and Halpern 1989].

Furthermore, while playing music, an important objective will be to convey a musical intention to the audience, and if the musician is not performing a solo, she/he has to interact with the other musicians. For these purposes, *communicative gestures* are performed. Video recordings of marimba performances animated with various intents have been analyzed without audio signals [Dahl and Friberg 2003]. Results indicate that the musical intention is well-conveyed with movements only, notably those of the head.

Finally, *sound-accompanying gestures* consist in movements performed as a response to music, as for instance while discussing or dancing [Dahl et al. 2009].

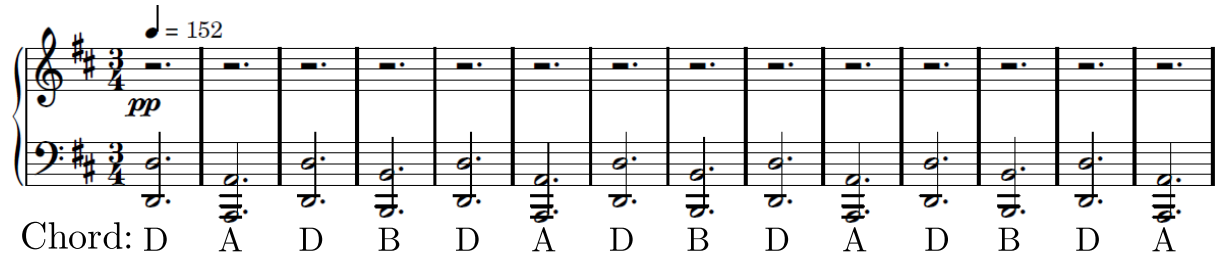
In this study, we mainly focus on the *sound-producing*, *sound-facilitating* and *communicative* gestures, in the case of the concert harp. Studies about this instrument mainly deal with its vibrational and acoustical behavior [Firth 1977; Bell 1987; Le Carrou et al. 2007a; Daltrop et al. 2010; Waltham and Kotlicki 2008; Le Carrou et al. 2010], regardless of the musician. Few others involve musicians to ensure a realistic excitation mechanism in the analysis of the instrument [Bell 1987; Le Carrou et al. 2010 2009]. Amongst these, a recent study of the plucking action [Chadefaux et al. 2012c] points out that the force generally used to put a harp string into vibration with the fingertip is about 10N, while strings' tension range from 200 to 500N. The concert harp, which is about 1.8m high and weights about 35kg, is mostly played seated and tilted toward the harpist's right shoulder. Hence, the specific ergonomic relationship between the harpist and his/her instrument imply that, within the family of plucked string instruments, the concert harp is amongst the most physically demanding instrument.

The current paper aims at describing the interaction between a harpist and her/his instrument in realistic playing conditions. Based on an acoustical and gestural investigation of the harp performance, we focus on the general posture of the harpist, relatively to the harp, and on the particular playing techniques involved at the hand and the whole upper-limb level. The experimental procedure carried out to investigate the harp performances is developed in Sec. 4.2. In Sec. 4.3 and Sec. 4.4, we define a set of relevant gestural and acoustical descriptors. Finally, comparative results between harpists are analyzed in Sec. 4.5, and discussed in relation to the musical context.

4.2 Experimental procedure

4.2.1 Measurement protocol

A set of experiments are carried out in order to investigate the gestural strategies of harpists in playing conditions. The experimental setup presented in Fig. 4.2 is mostly based on capturing the motion of harpists through reflective markers fixed on them, by using a tracking system (VICON system 460). It is composed of six infrared cameras set at 250 frames per second. The compromise on sample rate and spatial range allows the capture of the whole body except the head. Markers have been placed on the harpist according to the Plug-in-Gait model (VICON,

FIGURE 4.1 – Score of the analyzed excerpt of the Debussy’s *Danse Profane*.

Oxford Metrics Ltd, Oxford, UK)², combined with five additional markers on the harp. The chest of the harpist has not been tracked, since the harp would have obstructed the markers. Moreover, fingers motions have not been captured, as even the smallest markers (diameter of 3mm) disturbed the harpist’s playing. Simultaneously, all the performances have been recorded with two standard digital video cameras at different angles, and two microphones placed at about one meter of the harp’s column in the soundboard direction as shown on Fig. 4.2. Hence, this setup allows the synchronization of acoustical signals with the harpist and harp motions.

Three harpists with various musical skills have been invited to participate in these measurements. The first one (H_1) is a young professional orchestra musician. The second one (H_2) is a non-professional harpist, who practices daily and occasionally performs concerts. The third harpist (H_3) is also a professional orchestra musician. An unlimited warm-up period was offered to them, to get used to the harp (Aoyama Orpheus concert harp, with 46 strings) and to the experimental context. A typical adaptation time of about 15 minutes was observed. Then, harpists were asked to perform Debussy’s *Danse Profane*, as in a concert situation. The entire piece has been repeated three times consecutively for variability considerations. The *tempo* was indicated, but harpists were not asked to accurately follow it³ The study presented in this paper focuses on the beginning of the piece, corresponding to the excerpt of the score shown on Fig. 4.1. We selected this excerpt because it contains a repetition of three different chords, and this was a good testbench for gesture repeatability in a musical context. The three chords are octave intervals (D, A and B), performed with the left upper-limb only, and with no change in the pedal configuration. The physical characteristics of the 6 strings involved in this excerpt are reported in Tab. 4.1.

4.2.2 Gesture segmentation

In order to highlight the playing techniques and the musical strategies established by harpists while playing the musical excerpt presented on Fig. 4.1, we first investigated separately each chord. Hence, both the motion and the acoustical signals have to be segmented into 14 parts, each of them matching with a bar in the score. For this purpose, the onset of each sound event is first highlighted in the acoustical signal, through a standard onset detection algorithm [Bello et al. 2005; Duxbury et al. 2003]. These instants indicate the strings’ release, and are used

2. L’annexe A.2 illustre ce modèle.

3. Le protocole complet est proposé à l’annexe A.1.

TABLE 4.1 – Characteristics of the strings involved in the study.

	Freq (Hz)	Tension (N)	Length (cm)	Diameter (mm)	Material
37th, D_2	75	860	128.8	1.94	Steel
30th, D_3	147	292	97.5	1.96	Gut
40th, A_1	52	619	138.9	2.2	Steel
33th, A_2	104	407	113.2	2.36	Gut
39th, B_1	58	672	136	2.1	Steel
32th, B_2	116	401	108.1	2.2	Gut

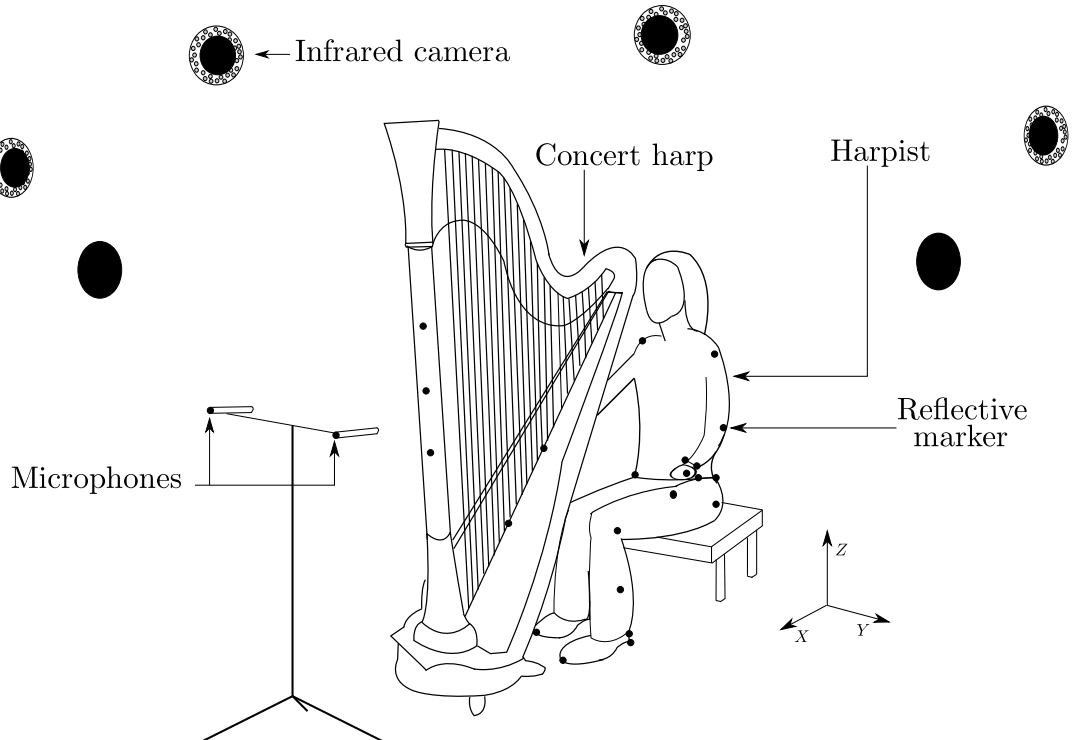


FIGURE 4.2 – Experimental setup.

to determine the onset of the sound-producing gesture. Following [Jensenius et al. 2009], this sound-producing gesture is defined as the excitation phase, surrounded by a prefix and a suffix. In the present case, the excitation phase is the plucking action. The prefix corresponds to the hand motion from the instant it touches the strings to the string release, which corresponds the acoustical onset. The suffix consists in the period between the string release and the instant the hand gets in touch with the next chord's strings. Experimentally, these instants are estimated based on the hand trajectories in the (x0y) plane.

4.2.3 Analysis systems of reference

The motion capture database consists in a collection of markers coordinates over time. They are evaluated in the Global Reference System which is defined as (X, Y, Z) on Fig. 4.2. Its origin is taken under the harpist seat. X and Y indicate the forward/backward and the medial/lateral directions, respectively, while Z is the gravitational axis. Although most analyses can be done in the Global Reference System, joints' kinematics can only be reached in systems of reference fixed to the limbs, called Anatomical Reference Systems. For this purpose, three anatomical reference systems are defined. They are referred to as (x_a, y_a, z_a) for the arm, (x_f, y_f, z_f) for the forearm, and (x_h, y_h, z_h) for the hand on Fig. 4.3. Within each limb, the z -axis is set along its length. Each anatomical reference system is set with its origin at the limb's estimated center of mass, denoted c_h, c_f and c_u on Fig. 4.3. To estimate their positions, a link-segment model is used, as shown on Fig. 4.3. It consists in three segments representing the left hand, forearm and arm. They are connected together at each upper-limb's joints : the wrist, the elbow and the shoulder. Finally, the position vector defining a limb's center of mass in the global reference system is

$$\vec{r}_{com} = \vec{r}_p + k(\vec{r}_d - \vec{r}_p), \quad (4.1)$$

where $\vec{r}_p$ and $\vec{r}_d$ are the positions of the proximal and the distal ends of the segment, and k is an anthropometric data for the distance between the center of mass and the proximal end to the segment length ratio. All anthropometric data used in the present study are extracted from [Winter 2009], while the body height and weight have been given by each harpist. Using the anatomical axes defined in Fig. 4.3 and choosing the arm's rest position right along the body with the palm towards the body, joints rotations are evaluated based on a kinematic model [Raikova 1992; Riener and Straube 1997].

4.3 Acoustical descriptors

The set of audio features used for sound description is potentially very large [Peeters et al. 2011]. In the present study, we use a small subset of these standard features, selected to highlight relationships between harpist's gestures and sound production. First, we used the deviation dT from the averaged rhythm [Fabre et al. 2010]. It is computed as the ratio between the actual chord duration and the expected chord duration. The latter corresponds to the theoretical duration of a bar at the played *tempo*. However, although the *tempo* is indicated in the score in

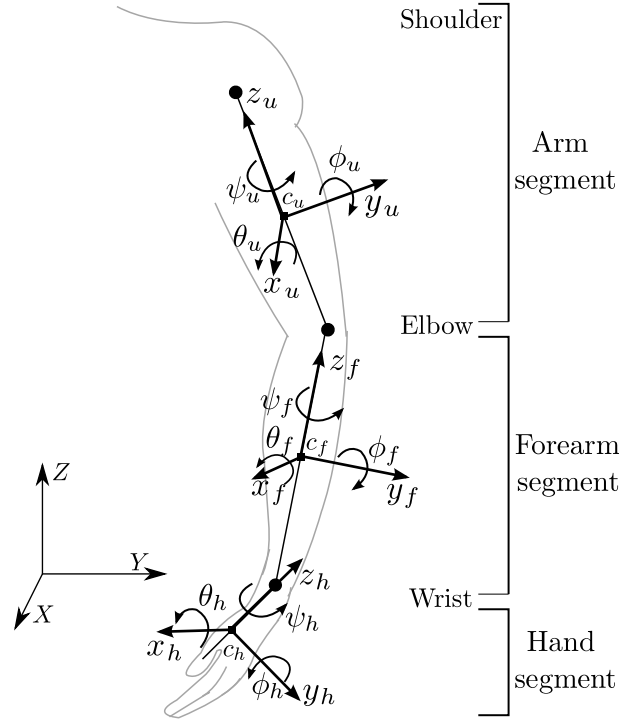


FIGURE 4.3 – Illustration of the global (X, Y, Z) and local $((x_a, y_a, z_a), (x_f, y_f, z_f), (x_u, y_u, z_u))$ reference systems used for the upper-limb motion.

Fig. 4.1, harpists have adopted their own *tempo*. Based on the acoustical onset detection method referenced in Sec. 4.2, individual *tempi* are estimated at 110bpm, 135bpm and 126bpm for H_1 , H_2 and H_3 , respectively.

As the different chords have not been played in isolation but rather in a musical context, it is not possible to directly compute the total amount of acoustical energy of each chord, which was hindered by, for instance, the onset of the following chord, or the strings' muffling by the harpist. Hence, in order to perform the same process for each signal, the analysis is based on the 150ms of each chord following its acoustical onset. The sound level of each chord is then computed with a moving average of 150ms along the excerpt. A set of classical spectral descriptors is also extracted from the acoustic signals. Denoting by X the discrete spectrum, of length N , of the acoustic signal and f the frequency index function, the spectral centroid is defined as

$$\mu = \frac{\sum_{k=1}^N f(k) |X(k)|}{\sum_{k=1}^N |X(k)|} \quad (4.2)$$

and is expected to be related to the brightness of the produced sound [Grey and Gordon 1978].

Then, the central moment of order 2, i.e. the spread σ of the spectrum around μ is defined by

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{k=1}^N (f(k) - \mu)^2 |X(k)|}{\sum_{k=1}^N |X(k)|}. \quad (4.3)$$

Both spectral centroid and spectrum spread are in Hertz. However, to study these descriptors on the different chords of the excerpt, they are normalized by the fundamental frequency f_0 of the lower note of each played octave. Eventually, the central moments of order 3 and 4, defining the skewness (SK) and the kurtosis (K) of the spectrum are calculated. They measure its energetic distribution's asymmetry and flatness around its centroid, respectively. They are computed as

$$SK = \frac{\sum_{k=1}^N (f(k) - \mu)^3 |X(k)|}{\sum_{k=1}^N |X(k)|}, \quad (4.4)$$

$$K = \frac{\sum_{k=1}^N (f(k) - \mu)^4 |X(k)|}{\sum_{k=1}^N |X(k)|}. \quad (4.5)$$

A null skewness indicates a symmetrical distribution around the spectral centroid, whereas a positive or negative value means that the spectrum contains more energy in frequencies higher or lower than its centroid, respectively.

4.4 Descriptors of the musical gestures

4.4.1 Kinematical description

The following section deals with the description of harpists' left upper-limb motion. To describe their kinematics during a performance, one needs a representation for its joints position, velocity and acceleration. This description is provided by a stick diagram as on Fig. 4.4. Three straight lines model limb-segments corresponding to the arm, the forearm and the arm, as defined in Sec.4.2.3. They represent their locations in space at a given instant. The movement is displayed every 20ms for a better readability than with the raw 4ms period. This kind of chronophotographic representation is widely used in human motion analysis [Winter 2009; Bartlett 2007]. It has also already been employed for instance to characterize preparatory movement strategies in drumming [Dahl et al. 2009]. This tool will be valuable to analyze how functions are shared amongst joints in the gesture performance.

The analysis of the films recorded during the measurement sessions indicates that if the hand motion is obviously involved to set the instrument into vibration, it also conveys information about the underlying musical intention. Assuming that the rest of the arm is only dedicated to

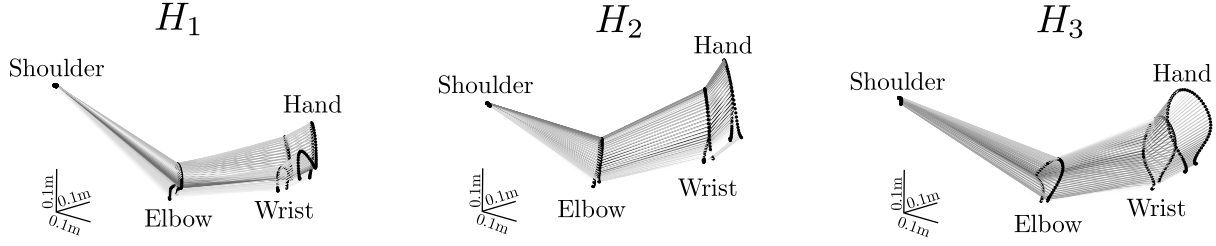


FIGURE 4.4 – Stick diagram of the left arm movements during the performance of a D-octave, during the last excerpt performance by the three harpists.

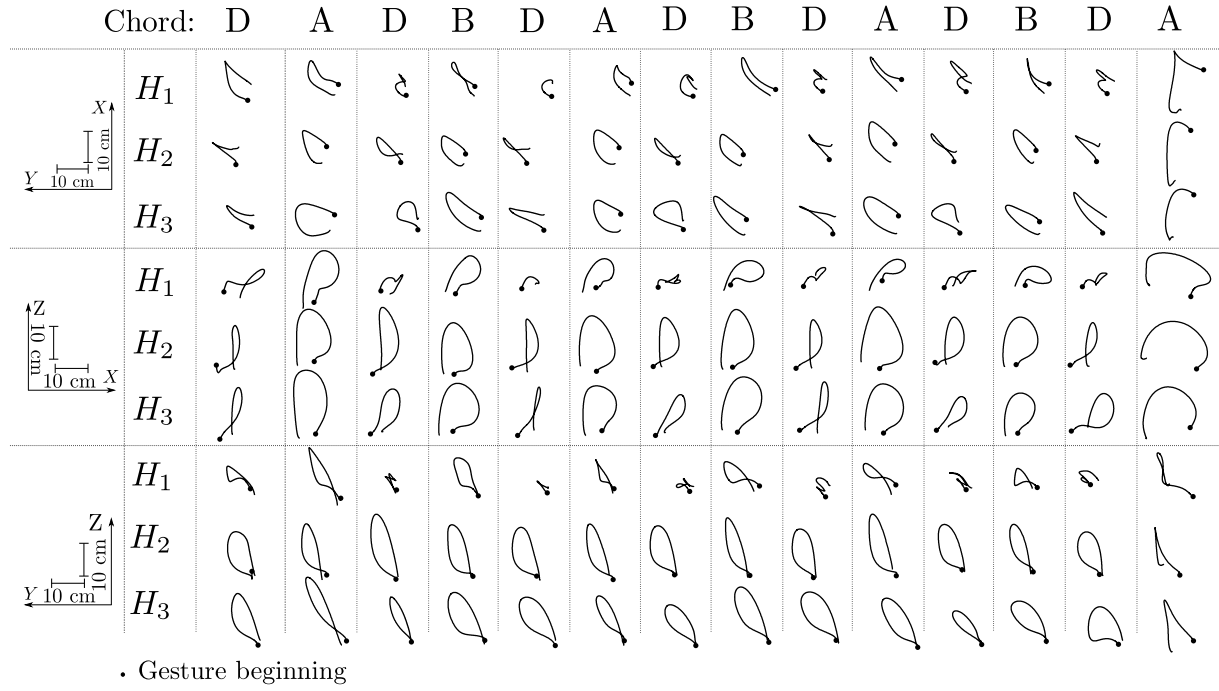


FIGURE 4.5 – Repeatability and characteristics of the three harpist's left hand movement related to each octave at the third performance of the Debussy's *Danse Profane* excerpt.

the global movement, the hand's movements are here investigated separately, focusing on the relationship between harpists' gestures and musical production. For this purpose, we draw on Fig. 4.5 the hand movements related to each octave in the (x0y), the (y0z), and the (x0z) planes.

The emphasis given by harpists on each chord is characterized by the motion pattern. It is here described by two kinematic features on the producing gesture : the maximal displacement D_{max} and the maximal velocity V_{max} . They are computed for the three limb-segments, for each chord.

4.4.2 Reaction forces and moments

This section defines dynamic descriptors of the harpists' motion. These descriptors will be useful to gain insight into how the physical attributes are shared in the harpists' motion. A link-segment model is applied to the harpist's motion, yielding an inverse solution that predicts

mechanical quantities at her/his arm joints. Each link-segment is assumed to be a rigid body. Their inertia matrix are computed assuming that the hand is a ball, while the arm and the forearm are truncated cones. As this method is well-detailed in the literature [Winter 2009], we summarize here the main steps :

1. Consider the more distal limb-segment in the model.
2. Estimate the forces and moments occurring at the distal end for the limb-segment, noted $\vec{F}_d$ and $\vec{M}_d$, respectively.
3. Deduce the proximal forces (noted $\vec{F}_p$) based on the limb-segment's center of mass's kinematic and the second Newton's law : $\vec{F}_p = m\vec{a}_{com} + \vec{F}_d + m\vec{g}$, where m is the limb's mass, computed according to the harpist's weight and the limb's to total body's weight ratio given in [Winter 2009], $\vec{a}_{com}$ is the acceleration of its center of mass, and $\vec{g}$ is the strength of the gravitational field.
4. Compute the proximal moments using Euler's rotational equations of motions :

$$\begin{cases} \sum M_x = I_x \alpha_x + (I_z - I_y) \omega_y \omega_z, \\ \sum M_y = I_y \alpha_y + (I_x - I_z) \omega_x \omega_z, \\ \sum M_z = I_z \alpha_z + (I_y - I_x) \omega_x \omega_y, \end{cases}$$

where $\omega_{x,y,z}$ and $\alpha_{x,y,z}$ are the components of the angular velocity and acceleration of the limb's center of mass, respectively, and $I_{x,y,z}$ are the moments of inertia about x, y and z axes in the anatomical reference system.

5. Compute the distal and proximal joints' mechanical power : $P_{d,p} = \vec{M}_{d,p} \cdot \vec{\omega}_{d,p}$.
6. Deduce the work done by the group of muscles related to this limb-segment by time-integrating the power curve under the considered movement duration.
7. Consider the next limb-segment in its anatomical reference system.

Eventually, forces and moments occurring throughout the plucking action have to be determined. These estimations are not straightforward since the experimental procedure does not provide finger motions. The finger/string forces are assumed to increase linearly until release. According to [Chadefaux et al. 2012c], the plucking action relative to a chord lasts about 150ms, and the maximal force ranges from 2N to 8N. As the exact plucking force cannot be obtained with this experimental setup, we assumed plucking forces between 2N and 8N, according to the measured sound level. These estimations are obviously not exact, and prevent an absolute analysis of the performances, but it is sufficient to observe the main trends between musicians and played chord. Besides, assuming that fingers are just pulling the strings without rotation during a chord performance, moments are neglected. It is therefore possible to compute the work done by each muscle group during each chord performance. More precisely, this conveys the amount of energy generated or absorbed by muscle groups at each arm joint - depending on the sign of the power curve-, during an octave performance.

4.4.3 Gesture's smoothness

In classical motor control theory, motion planning is assumed to be achieved by an organized sequence of sensory information. These information are of two kinds : input and output. For ins-

TABLE 4.2 – Characteristic angles (deg) of the harpist’s posture computed during the performance.

	Harp tilt	Back bending	Thighs opening	Shoulders /Hips	Shoulders /Harp
H_1	9°	6°	39°	14°	24°
H_2	7°	7°	21°	15°	26°
H_3	6°	5°	38°	17°	27°

tance, while plucking a string, input information consist in seeing the string, feeling our motion toward the strings, estimating its tension, and so on. Output information are the entire set of body adjustments as looking at the string, as well as adjusting muscle-activation [Saltzman 1979; Danion and Latash 2011]. Eventually, a hand trajectory, combined with a joint-space trajectory, a sequence of joint torques, and a sequence of muscle-activation are generated. As the underlying relationships between these phenomena are not straightforward, they are estimated using minimum principles. For instance, the minimum-jerk theory predicts a unique hand trajectory, based on the assumption that they are chosen such that the jerk-cost is minimal [Danion and Latash 2011]. Note that this principle does not allow the prediction of other phenomena, such as muscle-activation patterns.

The jerk-cost ($j_{c,t}$) is defined in [Nelson 1983] as a mean-squared jerk, while the jerk (j) is the rate of change of the movement acceleration. Besides motor control investigation, this descriptor also describes limb movement smoothness [Flash and Hogan 1985; Hogan 1984; Flash 1983]. For instance, its evolution during rapid arm movements and elbow flexion has been investigated in [Schneider and Zernicke 1989] and [Wiegner and Wierzbicka 1992]. In the present case, as harpist’s movements can be straightforward as well as sinuous, it is interesting to investigate both magnitudinal ($j_{c,m}$) and directional ($j_{c,d}$) jerk-cost components, to gain insight into the underlying harpist movement strategy [Schneider and Zernicke 1989; Hreljac 1993] :

$$j_{c,t} = j_{c,m} + j_{c,d}, \quad (4.6)$$

$$= \frac{1}{2} \int_0^T \|\dot{\vec{a}}\|^2 dt + \frac{1}{2} \int_0^T \|\vec{a}\|^2 (\dot{\theta}^2 \sin \phi + \dot{\phi}^2) dt, \quad (4.7)$$

where (a_x, a_y, a_z) are the components of the acceleration of the limb center of mass, $\theta = \arctan(a_y/a_x)$, $\phi = \arccos(a_z/\|\vec{a}\|)$ and T is the duration of the movement.

4.5 Discussion

4.5.1 Harpists’ global posture

Harpist/Harp relationship

This subsection provides a description of the harpist mean posture in a playing context. The most relevant angles describing geometrical relationships between the harpist and the harp are represented on Fig. 4.6. Their estimated values are reported in Tab. 4.2, over the three

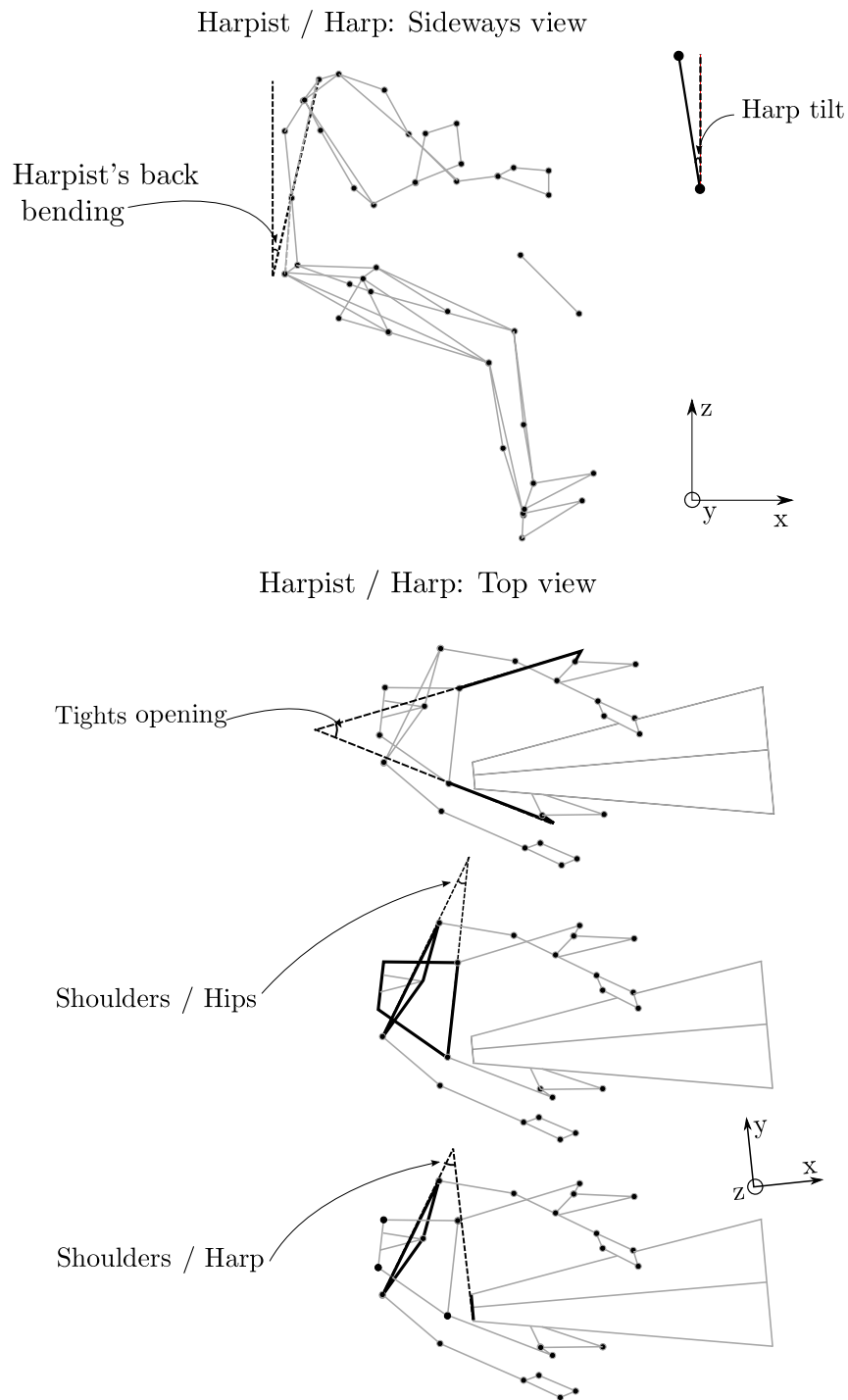


FIGURE 4.6 – Definition of characteristic angles for the harpists' posture related to the concert harp, in realistic playing conditions.

TABLE 4.3 – Left arm joints rotation (deg) computed during harp performance, according to systems of reference defined in Fig. 4.3. The mean is computed on the three repetitions, i.e. on the 42 chords performed by each harpist.

	H_1	H_2	H_3
Shoulder abduction (θ_u)	22.8°	22.1°	37.3°
Shoulder anteversion (Φ_u)	48.1°	56.6°	54.7°
Shoulder rotation (Ψ_u)	21.0°	14.8°	28.4°
Elbow flexion (Φ_f)	121.6°	114.9°	123.5°
Elbow supination ($-\Psi_f$)	17.8°	30.5°	14.3°
Ulnar deviation ($-\theta_h$)	43.3°	24.3°	48.4°
Hand dorsal extension ($-\Phi_h$)	26.8°	19.5°	-1.2°

performances for the three harpists. The variability is estimated to less than 0.5% of the mean value, indicating that the posture of the harpist is very stable during the excerpt performance. The posture adopted by the three harpists is globally the same, since the entire set of angles is of the same order of magnitude for all harpists. The small differences, notably for the thighs opening, can be explained by morphological reasons or slight differences in the reflective markers positioning. Although the played strings are at about 70cm of the harpist, she/he stands quasi upright to perform the excerpt : the back bending is estimated to about 7°. Thus, to be able to reach the lowest strings while standing upright, harpists seat sideways with respect to the plane of the strings, with an additional slight rotation of the shoulders relatively to the hips.

Upper-limb

Tab. 4.3 presents upper-limb joints rotations in the anatomical reference systems defined in Fig. 4.3. The reported values are computed for the three harpists, over the three repetitions of the excerpt. The variability is estimated at 0.1° for all of them, indicating that the upper-limb posture is very stable through the performance. This result was expected due to the unchanged playing technique through chords, and the proximity of the involved strings. Besides, the stabilized relationship between each limb-segments indicates that the upper-limb tends to be controlled as a block. An interesting observation is that the left arm joints rotations reported in Tab. 4.3 are globally of the same order of magnitude according to each harpist. However, the posture adopt by the harpist H_2 slightly deviates regarding harpists H_1 and H_3 , for instance through the elbow flexion, or the elbow supination, as well as the ulnar deviation. It may indicate that harpists H_1 and H_3 adopt the same performing gesture strategy, while harpist H_2 performs the piece with a different one.

4.5.2 Control of the arm

In this section, we focus on the left upper-limb gesture performed by harpists while playing. Using a chronophotographic representation, Fig. 4.4 shows the whole left arm movement of the three harpists performing a D-chord. The latter was chosen because of its relevance in relation to

TABLE 4.4 – Work (J) generated by the three muscle groups averaged for each octave performed by the three harpists.

The mean is computed on the three repetitions, i.e. on the 42 chords performed by each harpist. The reported uncertainty represents a 95% confidence interval.

	Wrist	Elbow	Shoulder
H_1	9.1 ± 0.2	36 ± 1	102 ± 2
H_2	14.1 ± 0.3	45.0 ± 0.8	47 ± 1
H_3	10.4 ± 0.2	47.0 ± 0.9	79 ± 1

TABLE 4.5 – Descriptors of the left upper-limb motion and the acoustic signals averaged for each octave performed by the three harpists. The mean is computed on the three repetitions, i.e. on the 42 chords performed by each harpist. The reported uncertainty represents a 95% confidence interval.

Descriptors	H_1	H_2	H_3
$\frac{\mu}{f_0} (\sim)$	36 ± 3	23 ± 2	28 ± 2
$\frac{\sigma}{f_0} (\sim)$	75 ± 5	58 ± 4	66 ± 4
SK ($\sim$)	2.7 ± 0.1	3.9 ± 0.1	3.2 ± 0.1
K ($\sim$)	9.7 ± 0.8	18.1 ± 0.9	12.8 ± 0.5

the entire set of measured movements. One interesting result relates to the movement distribution between joints. The shoulder appears to be quite still, whereas elbow, wrist and hand move with an increasing magnitude. The descriptor D_{max} , defined in Sec. 4.4.2, and averaged over each harpists' performances, provides the following results :

- Shoulder : $\langle D_{max} \rangle = 18\text{mm} \pm 3\text{mm}$,
- Elbow : $\langle D_{max} \rangle = 90\text{mm} \pm 6\text{mm}$,
- Wrist : $\langle D_{max} \rangle = 133\text{mm} \pm 11\text{mm}$,

This shows that the shoulder's displacement is about 5 and 7 times lower than the elbow and wrist displacements, respectively, for every chord. About the same ratio are estimated on the maximal velocities of the arm joints motions. Thus, as expected due to its relative mass, the shoulder appears to be the most stable joint, controlling the arm movement.

Considering Tab. 4.4, we first observe that the way the energy is shared between the forearm and the arm appears to be harpist-dependent. Furthermore, the work generated at the wrist is between 3 and 4.5 times lower than at the elbow, while the trend is not as straightforward regarding the shoulder. Indeed, the shoulder-to-elbow work ratio is about 2.2 for harpists H_1 and H_3 and is about 1.0 for H_2 . This tends to confirm that the shoulder is responsible for the movement control. According to harpists, this result seems to be also related to the pain they often feel at the deltoid muscle.

TABLE 4.6 – Jerk-cost (m^2/s^5) averaged for each octave performed by the three harpists. The mean is computed on the three repetitions, i.e. on the 42 chords performed by each harpist. The reported uncertainty represents a 95% confidence interval.

	$J_{c,t} (\times 10^6)$	$J_{c,m} (\times 10^6)$	$J_{c,d} (\times 10^6)$
H_1	13 ± 3	4 ± 1	9 ± 2
H_2	33 ± 10	9 ± 2	24 ± 8
H_3	18 ± 5	7 ± 2	11 ± 3

4.5.3 Description of hand gestures

Fig. 4.5 presents the harpists' hand trajectories in the (x0y), (z0x) and (y0z) planes for each chord in the musical excerpt. As the repeatability of harpists' movements has already been shown in [Chadefaux et al. 2012cd], we select the more reliable performance for each harpist⁴. The general shape of the hand motion is globally the same due to score performance constraints. However, the observed motion changes in various proportions depending on the harpist. For instance, in the (z0x) plane, small differences occur between harpists H_2 and H_3 , while the harpist H_1 provides clearly different hand motions. These differences, as small as they are, are relevant on the whole set of movements provided in Fig. 4.5, as for the variation in emphasis direction on D-chords between H_2 and H_3 . Thus, hand motions appears to be specific to the harpist. Finally, an interesting observation is that the hand trajectory is more sinuous when the hand moves forward than backward. In the former case, i.e. the gesture following a D-octave production, the hand draws a loop in the (z0x) plane, whereas the path is straightforward after playing a A- or a B-octave.

Tab. 4.6 presents the jerk-cost (defined in Sec. 4.4.2) computed on the hand motion of each harpist, and averaged for each chord. The total jerk-cost associated to its directional and magnitudinal components are reported. Results indicate that the total jerk-cost is mostly composed of the directional component (about 70%). Concerning harpist H_2 , the jerk-cost is from 2 to 3 times higher than for harpists H_1 and H_3 . These results are in agreement with those obtained in Tab. 4.4 about the work generated at the hand. A lower amount of energy has to be provided to carry out a smooth motion than a jerky one. Besides, observation of the video recordings made during performance tends to indicate that harpist H_2 plays less *legato* than the others. This result may indicate an expertise difference between harpists. It means that the jerk-cost may be an interesting descriptor of the harpist playing strategy.

4.5.4 Relation to the sound production

In order to investigate how the harpist's hand relates the score interpretation, we here study the relation between musical, acoustical and gestural data. Fig. 4.5 shows that the hand motion pattern for the last chord of the excerpt differs from the previous ones for all performers. This can be interpreted in terms of the necessary anticipation phenomenon implied by the *allegro*

4. L'intégralité des trajectoires mesurées lors des trois interprétations de l'extrait par chacun des harpistes est proposée à l'annexe B.

TABLE 4.7 – Maximal displacement (mm) of the wrist averaged for each octave performed by the three harpists. The mean is computed on the three repetitions performed by each harpist, i.e. on twenty-one, twelve and nine samples for D, A and B octaves, respectively. The reported uncertainty represents a 95% confidence interval.

Octave	D	A	D	B
H_1	97 ± 15	131 ± 22	104 ± 14	112 ± 24
H_2	132 ± 9	149 ± 12	148 ± 13	143 ± 14
H_3	156 ± 8	147 ± 11	140 ± 7	140 ± 11

sequence, which begins in the bar right after the current *moderato* sequence. Besides, harpist H_1 produces a particularly different gesture for this last chord, as compared to harpists H_2 and H_3 . The video analysis of these performances indicates that, as the harpists' right hand is not involved in plucking in this excerpt, harpists H_2 and H_3 keep it on the thigh, and move it towards the right position to play the next sequence at the antepenultimate bar. However, harpist H_1 places her/his right hand on the strings from the beginning of the excerpt. This phenomenon, which is mainly noticeable for the last played chord in the (x0y) plane in Fig. 4.5, can be observed in the deviation from the *tempo*. Fig. 4.7 reports the evolution of the sound level, defined in Sec. 4.3, corresponding to the same performances as presented on Fig. 4.5, as well as the maximum shoulder's displacement in millimeters and the deviation's percentage dT associated to each onset. For instance, the first B-chord performed by harpist H_2 lasts $dT = 5\%$ less than the mean chord duration over the entire performance, while the shoulder moves by 28mm. The last deviation reported for each harpist indicates that they tend to reduce the last chord duration by 23%, 6%, and 13%, respectively, probably to emphasize the break between the two parts of the piece.

An interesting trend is conveyed by the shoulder's maximum displacement of harpist H_1 and, to a lesser extent, of harpist H_2 : the lower the sound level, the higher the shoulder displacement. Indeed, performing at a low sound level suggests a finer gesture accuracy comparatively to when playing at a high level, and we can expect that musicians will benefit from large movements to gain into control over sound parameters, such as sound level.

A second difference appears in the score interpretation between harpist H_1 and harpists H_2 and H_3 in Fig. 4.5, at the chord playing level. Considering any plane including the vertical axis, and mostly the plane (y0z) orthogonal to the string's plane, the hand motion of harpist H_1 appears to be confined to a small area while playing D-chords. This is correlated to the smaller D_{max} values reported in Tab. 4.7 for D than A and B. Moreover, Fig. 4.7 presents the sound level L_{dB} estimated for the three harpists along the 14 played chords. After each acoustic onset, the sound level decreases until to the next onset. The sound level decays for each chord played by harpist H_1 is more sinuous than for harpists H_2 and H_3 . Some of the curves observed for the latter harpists exhibit a peak close to the next acoustical onset, which probably corresponds to the instant fingers touch the strings, in order to perform the following chord. However, considering harpist H_1 , two peaks can be observed. An explanation is that harpist H_1 , contrary to harpists H_2 and H_3 , muffles chords with the left hand, preventing a large hand gesture and stopping

string's vibrations. A visual observation of the performances confirms this assumption.

The comparison of Fig. 4.5 and Fig. 4.7 gives us some insight on how harpists organize their interpretation of this excerpt. Considering the hand motion provided in the (x0y) plane, harpists provide different emphasis to two consecutive D-chords. Indeed, two different motion patterns exist alternatively for the D-chord, whereas A- and B-chords are played with a comparable motion throughout the excerpt. This indicates that harpists tend to interpret the excerpt on a 2- or a 4-chords structure, by providing a different emphasis to each D-chord. Furthermore, Fig. 4.7 shows three acoustical level patterns of a four chords sequence (D-A-D-B) for harpists H_2 and H_3 . The third pattern is practically the same as the first one for harpist H_3 , while the three patterns are almost the same for harpist H_2 . Besides, no pattern can clearly be highlighted from the harpist H_1 data. These results are confirmed by the temporal deviation dT reported in Fig. 4.7. Harpist H_1 emphasizes the relative duration of each D-chord, therefore playing on a 2-chords structure, while harpist H_3 emphasizes the first D-chord and the B-chord of the D-A-D-B sequence, on a 4-chords structure. These results are consistent over the three investigated performances. They can be related to the strategies musicians set up to distinguish notes in a bar and then to emphasize the temporal structuration. It has been shown that they can consist in rising the acoustical level, or in playing more *legato*, as well as in slightly delaying the following note, or a combination of these strategies [Sloboda 1986; Deutsch 1982].

While the investigation of harpists' hand motion has been shown to be a valuable tool for the interpretation of playing strategies such as piece structure or playing techniques, their relationships with acoustical features are not straightforward without a simultaneous investigation of the finger-string interaction. However, the analysis of the acoustical signals indicates that each harpist produces her/his own individual sound at the note level. Indeed, the spectral descriptors, shown on Tab. 4.5, appear to be of the same order of magnitude for each harpist. The small uncertainties indicate that these values are specific to each harpist and not to the played chord. As these spectral features are directly related to the initial conditions of the string vibrations, and keeping in mind that the harp and the microphones positions were not changed between measurements sessions, this confirms the claim [Chadefaux et al. 2012c] that each harpist provides specific string's initial shape, velocity, polarization and rotation to the string during the plucking action. Hence, the three harpists seem to pluck strings differently from each other, producing chords with specific spectral features. Besides, the sound level decay associated to each chord is shown on Fig. 4.7. We can observe that the decay of each D-chord varies among harpists and throughout a given performance. This could be due to the acoustical radiation of the harp excited by the string plucking [Le Carrou et al. 2010], as well as in sympathetic phenomena [Le Carrou et al. 2009]. However, the variations occurring within a given excerpt can also be explained by different playing techniques. For instance, the initial angle of polarization of the string vibration led by fingers at the release affect the balance between the two string's polarization and, then, its sound level decay.

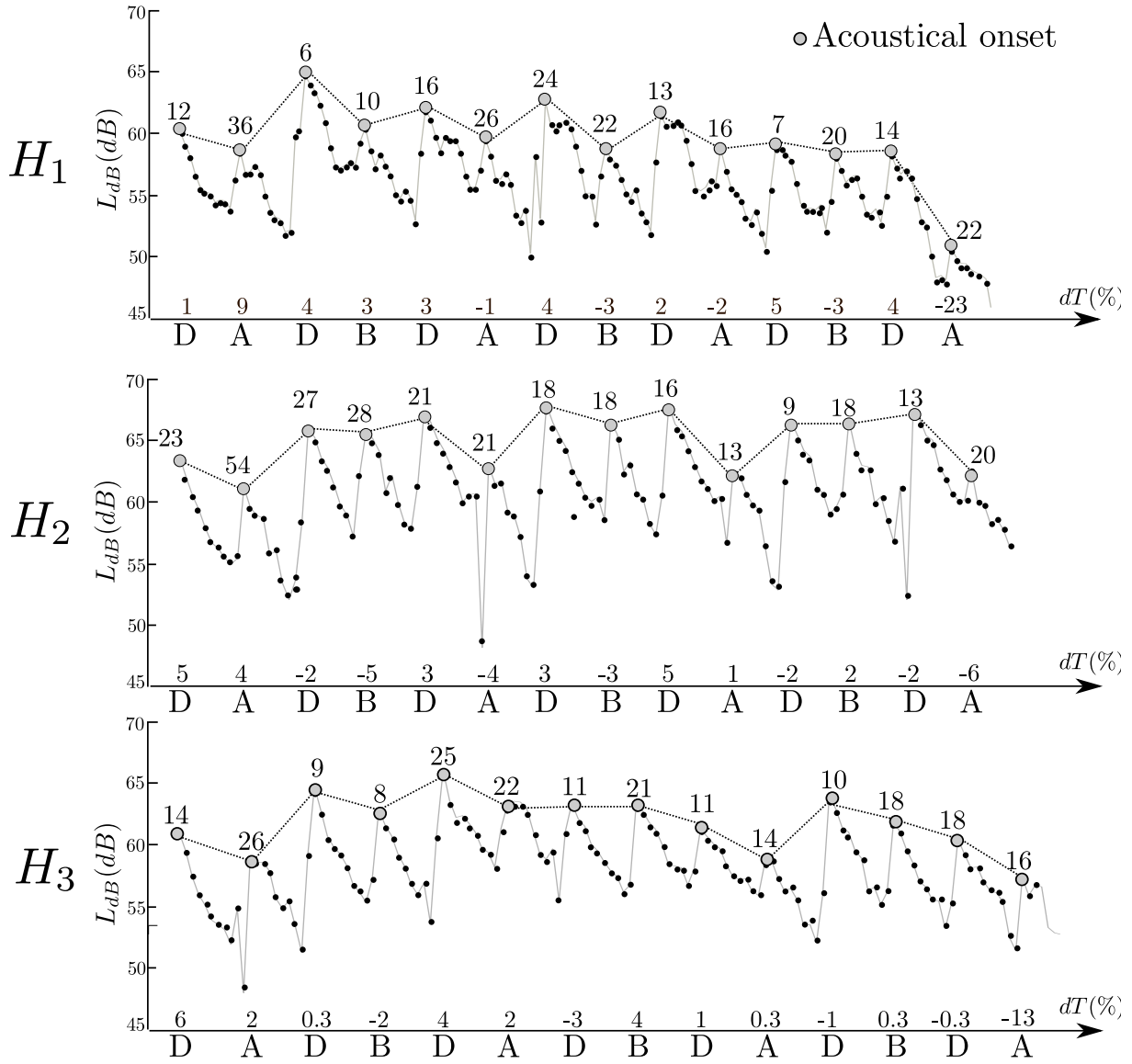


FIGURE 4.7 – Acoustical level, computed on a 150ms moving average, associated to the percentage of *tempo* deviation for each note and the maximal shoulder's displacement (mm). These descriptors are computed on the last execution of the excerpt by the three harpists.

4.6 Conclusion

This paper has investigated the gestural strategies underlying harp performances. A harpist motion capture combined with the recording of video and audio signals has been carried out for three skilled harpists in a musical context. We have presented a study of the postural relationship between the harpist and her/his instrument at both the global body and the upper-limb level, relatively to the musical context. This analysis was based on kinematic and dynamic descriptors.

Estimations of the harpist's global posture indicate that, in spite of morphological differences, they adopt practically the same posture in playing conditions, and this posture remains constant throughout the performance. This observation also applies to the upper-limb posture, whose motion is performed as a unique block. The investigation of how the mechanical energy is shared out within the upper-limb pinpoints that the shoulder controls the global motion of the upper-limb, for the three harpists. Conversely, how much of the mechanical work is done by each limb while playing, i.e. the performing gesture strategy, is harpist-dependent. The only permanent feature is the minimization of the energy generation at the hand for the three harpists. Besides, while the shoulder drives the motion, the hand is obviously responsible for the *sound-production* through the plucking action, as well as for *sound-facilitating* and *communicative* gestures. These three kinds of musical movements have been investigated here. A relationship has first been highlighted between the amount of energy generated by the hand and a smooth gesture production. Furthermore, gestures performed by the hand are related to the excerpt performance. Indeed, the anticipation phenomenon is clearly pointed out in their shapes. Moreover, the harpists' interpretation of the excerpt is shown by the various emphasis they provide to hand gestures, as well as in dynamic patterns. For instance, the stress on upbeats and downbeats appears as an important factor for interpretation.

A finer study would be necessary to further characterize the relationship between hand gestures and produced sound. Such an experimental study, involving both the harpist's body and the fingers' motions, would be necessary to quantify the impact of the plucking action on the string's free oscillations, through its initial conditions. Besides, a detailed analysis of videos recordings would be of great interest to study how communicative gestures, such as head balance, help the harpist to convey her/his musical intention or to execute the excerpt as desired. Eventually, a kinematic and dynamic investigation of the harpist motion, combined with electromyographic measurements, could be useful to characterize playing strategies against muscle and joints injury.

Chapitre 5

Experimentally-based description of harp plucking¹

Abstract

This paper describes an experimental study of string plucking for the classical harp. Its goal is to characterize the playing parameters that play the most important roles in expressivity, and in the way harp players recognize each other, even on isolated notes - what we call the “acoustical signature” of each player. We have designed a specific experimental setup using a high-speed camera that tracks some markers on the fingers and on the string. This provides accurate 3D positioning of the finger and of the string throughout the plucking action, in different musical contexts. From measurements of ten harp players, combined with measurements of the soundboard vibrations, we extract a set of parameters that finely control the initial conditions of the string’s free oscillations. Results indicate that these initial conditions are typically a complex mix of displacement and velocity, with additional rotation. Although remarkably reproducible by a single player - and the more so for professional players -, we observe that some of these control parameters vary significantly from one player to another.

1. D. Chadeaux, J.-L. Le Carrou, B. Fabre and L. Daudet, “Experimentally-based description of harp plucking”, *J. Acoust. Soc. Am*, vol. 131(1), pp 844-855, (2012).

5.1 Introduction

The physics of musical instruments has been studied to a point where many instruments can now be modeled to produce realistic sound synthesis [Derveaux et al. 2003; Penttinen et al. 2006]. However, the ways to control this synthesis is currently an active field of research, focusing on the detail of the interaction between the players and her/his instrument, in real musical playing conditions. This is related to the notion of “sound quality”, which both players and instrument makers try to optimize. During many years of training, a player develops his ability to control the sound quality in a highly reproducible way. The movement of the bow in the case of bowed strings, or the plucking of the string in plucked string instruments, is developed by the player in order to control the attack, the loudness and more generally the whole set of expressive qualities of each note.

In this study, we focus on the less studied case of plucked strings. During the plucking action, the player transfers energy to the string, providing the initial conditions for the free oscillation that follows. The individual morphology of the finger and the detail of the motion before the free oscillation can be described as the basic element of the individual technique of the player. The initial conditions of the free oscillation of the string reflect the past history of the plucking action, from the gesture preparation to the final launch of the string. The resulting sound is therefore affected by the history of the plucking action, marked by the player’s signature. The idea of a different signature for each player was an initial motivation for this work. Some trained harp players even claim, in informal discussions, that they even can recognize each other through a single note. While the confirmation of this claim would require a large statistical study, the goal of this work is to investigate which features in the initial string excitation could potentially explain players’ differences.

Through the centuries, the harpists playing technique has evolved with changes in string tension and material. In medieval Europe, brass harp strings were plucked and even struck with long fingernails [Griffiths and Rimmer 2001], a technique also used by Irish harpers who struck the brass strings of their harps with specially trimmed long fingernails [Griffiths and Rimmer 2001]. During the Renaissance, horsehair strings were plucked with the fleshy part of the fingers. This technique is close to the classic one still in practice nowadays for the concert harp, as a result of continuity in teaching since the late of 18th century. From that time on, harp has been played with both hands on either sides of vertical strings [Griffiths and Rimmer 2001]. In preliminary studies, the plucking action in the concert harp was briefly described in order to propose a simple interaction model [Le Carrou 2006; Le Carrou et al. 2007b 2008]. Other studies concerning the harp focus on the instrument itself (modal studies [Firth 1977; Bell 1987; Le Carrou et al. 2007a; Daltrop et al. 2010], instrument homogeneity [Waltham and Kotlicki 2008; Le Carrou et al. 2010]), sometimes using a harpist to pluck the strings [Bell 1987; Le Carrou et al. 2010 2009].

The general mechanism of plucking strings can be described as a succession of three temporal phases [Chaigne and Kergomard 2008] : the string is pulled from its initial position until at a particular threshold force (sticking phase), the string slips on the plectrum or on the finger (slipping phase) until it loses contact and is free to vibrate (free oscillation phase). For the

harpichord, this plectrum-string interaction was experimentally studied in detail [Giordano and Winans II 1999] : initial conditions during normal playing were measured and, with a particular set-up, the plectrum force during all the interaction (sticking and slipping phase) has been estimated. These results allowed the authors to validate a simple plucking model. For the guitar, a detailed description of the finger-string interaction was proposed by Pavlidou [Pavlidou 1997]. In this study, the string displacement in two transverse directions was measured at one point during the plucking action. These measurements were then used to validate a model predicting the trajectory of the plucking position during and after the interaction. With this model, a parametric study has shown that the guitar player has a great influence on the sound production, due to the frictional force between string and the fingertip, the response of the finger-muscle and the fingertip mass, and the initial direction of the finger's movement (angle of attack). The latter parameter has also been studied by Woodhouse [Woodhouse 2004a] : using a frequency domain approach to synthesize the guitar pluck, he has shown the influence of the plucking angle on the spectrum of body acceleration. For the harp, a preliminary study [Chadefaux et al. 2010] was focused on the analysis of the plucking action, but this study was done in a non musical position since the harp could not be tilted onto the harpist's shoulder, and was also restricted to two harp players.

The current paper is part of a general study that aims at relating the initial touch of the finger on the string to the sound produced by the harp. This paper focuses on the plucking of a concert harp in different musical conditions and with different fingers, rather than on the sound produced. The experimental procedure that studies the reproducibility of the plucking is described in Sec. 5.2. Then, a set of descriptors for the plucking has been developed (in Sec. 5.3). Finally, these descriptors are used to compare different pluckings (in Sec. 5.4).

5.2 Experimental procedure

5.2.1 Experimental setup

To study the plucking action, a specific experimental setup was designed (Fig. 5.1). It is mostly based on filming the finger/string interaction with a high-speed camera, which allowed us to estimate the finger and string trajectories. Simultaneously, the soundboard vibrations were also measured. It is important to note that the high-speed camera was fixed to the harp, musicians could therefore tilt the instrument at their convenience, as in a usual musical performance. The high-speed camera (Phantom v5.1) was set at 5167 frames per second, and gave access to the finger and string movements in the three-dimensional space, denoted (x_s, y_s, z_s) and (x_f, y_f, z_f) respectively. Indeed, as the motion was performed in the plane perpendicular to the strings [Le Carrou et al. 2007b; Chadefaux et al. 2010] ($\vec{e}_x, \vec{e}_z$, defined in Fig. 5.1), displacements along the first axis were directly known by positioning the camera in front of the strings, and movements along the second axis were obtained through a mirror (Fig. 5.1). The latter was fixed to the harp by two means : it is fixed directly to the soundbox and it is also fixed to the high-speed camera. In this way, the position of the mirror was not affected by the vibrations of the instrument. Finally, an accelerometer (B&K 8001) measured the resulting vibrations. It was

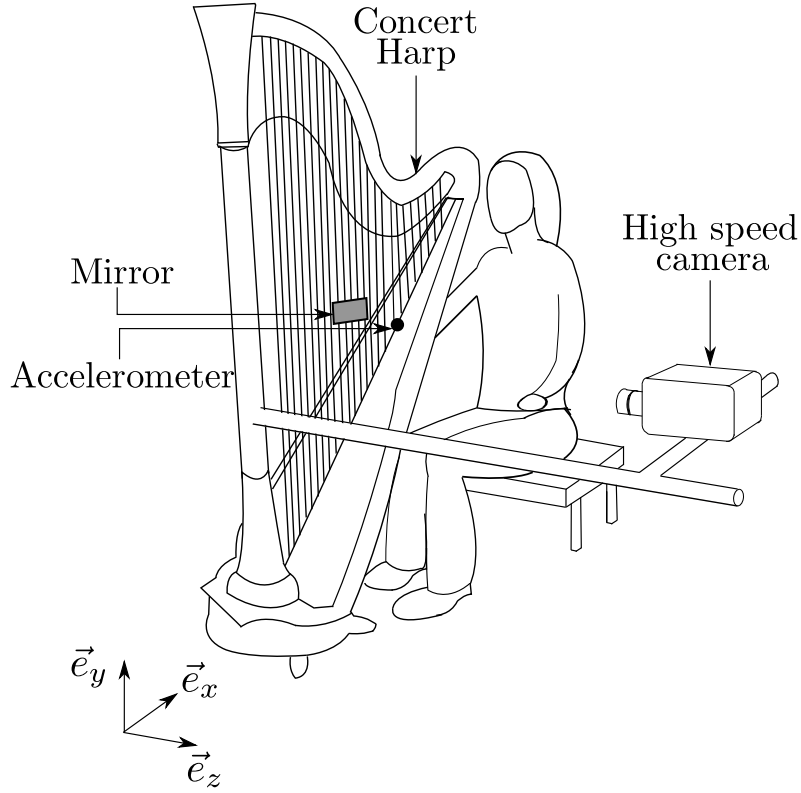


FIGURE 5.1 – Experimental setup.

fixed to the bottom of the 16th string, at the back of the soundboard.

Fig. 5.2 shows images obtained through the high-speed camera, in direct and mirror view. One can see markers (highlighted black dots) on the fingertip and on the string on either side of the plucking position. A pinhead was also fixed to the string, as close to the plucking point as possible, to measure its angular deviation over time. These markers were then individually tracked on every video frame of the plucking action². This was detected automatically through image processing, using a block-matching algorithm combined with an active contour model [El-Azim 2002; Chan and Vese 2001]. This gives an accurate estimation of the markers' positions through time : $x_f(t)$, $z_f(t)$, $x_p(t)$, $z_p(t)$, $x_{s_1}(t)$, $x_{s_2}(t)$, $z_{s_1}(t)$ and $z_{s_2}(t)$. The string trajectory $(x_s(t), z_s(t))$ is then computed using string's markers $(x_{s_1}(t), x_{s_2}(t), z_{s_1}(t)$ and $z_{s_2}(t)$ in Fig. 5.2), assuming that the string is flexible.

As the camera was fixed to the harp, both string markers define the plucking area on the string (Fig. 5.2). In this way, the plucking position was imposed on the harpists, which allowed us to point out the musicians' individual and common characteristics, regardless of the plucking position.

2. L'annexe C expose le processus employé afin d'estimer les trajectoires ainsi que les incertitudes associées.

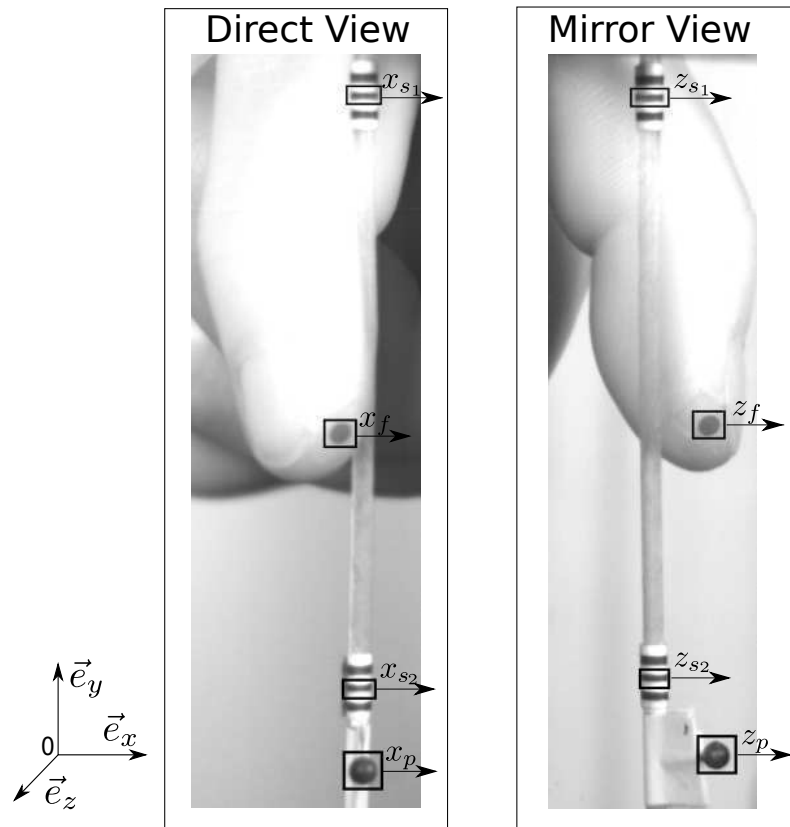


FIGURE 5.2 – Markers used to determine finger and string trajectories, and string rotation, during the plucking action.

	Freq (Hz)	Tension (N)	Length (cm)	Diameter (mm)	Material
9th, D$\flat$5	1109	86	17.6	0.7	gut
16th, D$\flat$4	554.4	129	31	1.02	gut
23th, D$\flat$3	277.2	168	54.2	1.32	gut
30th, D$\flat$2	138.6	260	97.5	1.96	gut

TABLE 5.1 – Characteristics of studied strings [Le Carrou 2006]. The trajectory study is performed on D $\flat$ 2

5.2.2 Measurement protocol

Players were asked to play on a concert harp (CAMAC harps, Atlantide Prestige model) in several musical contexts to obtain a representative set of plucking actions : chord and arpeggio sequences performed *mezzo-forte* with forefinger, annular finger or thumb of the right hand³.

Obviously, performing chord or arpeggio sequences involves several strings. However, the dimension of an image obtained by the high-speed camera is restricted to a small area of 480x600 pixels. Therefore, we only had access to the movement of a single string, within these chord and arpeggio sequences. This note was extracted from the whole film sequence, before its analysis.

In order to pinpoint the harp players' individual and common characteristics, ten harpists with different musical skills were asked to participate in these measurement sessions : six professionals and four amateurs, noted H_1 to H_6 and H_7 to H_{10} , respectively. In this paper, the adjective *professional* refers to harp teachers or concert performers, while *amateur* means non-professional players who occasionally practice the concert harp.

Regarding the vibratory study, harpists were asked to play only isolated notes. They repeated each note eight times by fingering (thumb, forefinger and annular), damping the vibration between each in order to facilitate the study of each signal.

The physical characteristics of the studied strings are given in the Tab. 5.1. As the present study focuses on the right hand, which is rarely used to pluck lower notes, all the studied notes are higher than the second octave. While the trajectory study was performed only on the D $\flat$ 2, the vibratory study involved the D $\flat$ at four different octaves, to have some information about the influence of the *tessitura* on the harp plucking. Note that the *tessitura* of the concert harp used is from about 30.9 Hz (Cb0) to 2960 Hz (Gb6).

5.3 Descriptors of the harp plucking

In order to characterize the harp plucking depending on the musical context, a set of descriptors was defined, based on the string displacements (temporal phases, trajectories, initial conditions) and soundboard vibrations (plucking position and cutoff frequency).

3. Le protocole complet est proposé à l'annexe A.1.

5.3.1 Temporal phases

Following previous studies [Pavlidou 1997; Le Carrou 2006; Le Carrou et al. 2007b 2008; Derveaux et al. 2003], the plucking action can be decomposed into several sequences, as shown in Fig. 5.3 :

- The approach phase (Fig. 5.3(a)) : the finger approaches the string which is at its rest position $\forall t < t_c$
- The sticking phase (Fig. 5.3(b)) : the finger and the string move in parallel at the contact point $\forall t \in [t_c; t_s[$;
- The slipping phase (Fig. 5.3(c)) : the finger and the string are still in contact, but the string slips on the finger surface with opposite direction $\forall t \in [t_s; t_r]$;
- The free oscillations phase (Fig. 5.3(d)) : the finger and the string are no longer in contact $\forall t > t_r$.

The estimation of each instant (t_c, t_s, t_r) was made using the harp plucking film. First, the beginning of the sticking phase is automatically determined at the first instant where the finger and the string are in contact and the string does not oscillate anymore, using finger and string trajectories. Then, the slipping instant detection is defined as the instant where the finger and the string move with opposite directions. Finally, the release instant is estimated as the instant where the string acceleration suddenly jumps. Note that for these events, detection is manually performed by observing the filmed plucking. We estimate the uncertainty of this estimation at about 3 frames, i.e. about 0.58 ms.

5.3.2 Finger and string trajectories

About 15 plucking actions were filmed for each harpist. The analysis of these curves shows repeatable patterns for each harpist and musical context. In the present section, a representative example has been chosen to describe the way the finger and string trajectories are analyzed : a note extracted of a chord sequence, performed with the right annular finger by a professional harpist.

According to the frame of reference defined in Fig. 5.4(a), Fig. 5.4(b) presents the finger and string displacements during the plucking. While the left curve represents the movement of the finger during the plucking action, from the beginning of the sticking phase (t_c) to the end of the slipping phase (t_r), the right curve shows the trajectory of the string from the beginning of the sticking phase (t_c) to its first free oscillations. Note that, as expected, the movement of these free oscillations is close to elliptic.

Note that the original position at t_c of the finger and string are not superimposed because, to make the automatic movement detection easier, the finger position is measured close to the nail while the string is plucked with the pulp. The distance between the finger and the string at the initial time t_c therefore corresponds to the thickness of the finger.

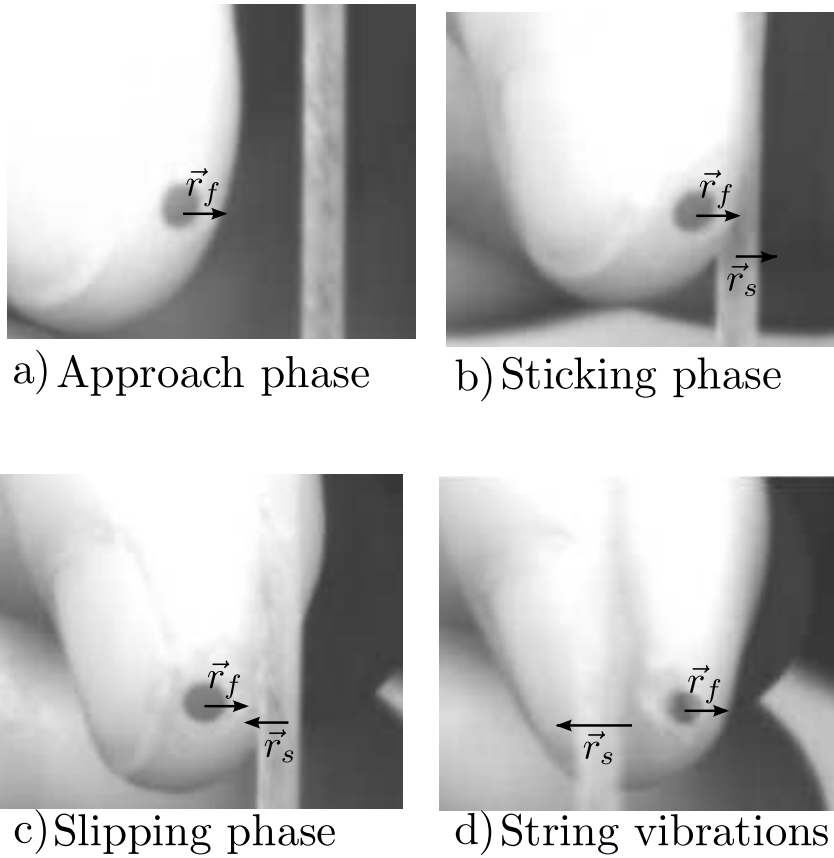


FIGURE 5.3 – Finger and string interaction phases. a) Approach phase. b) Sticking phase. c) Slipping phase. d) String vibrations

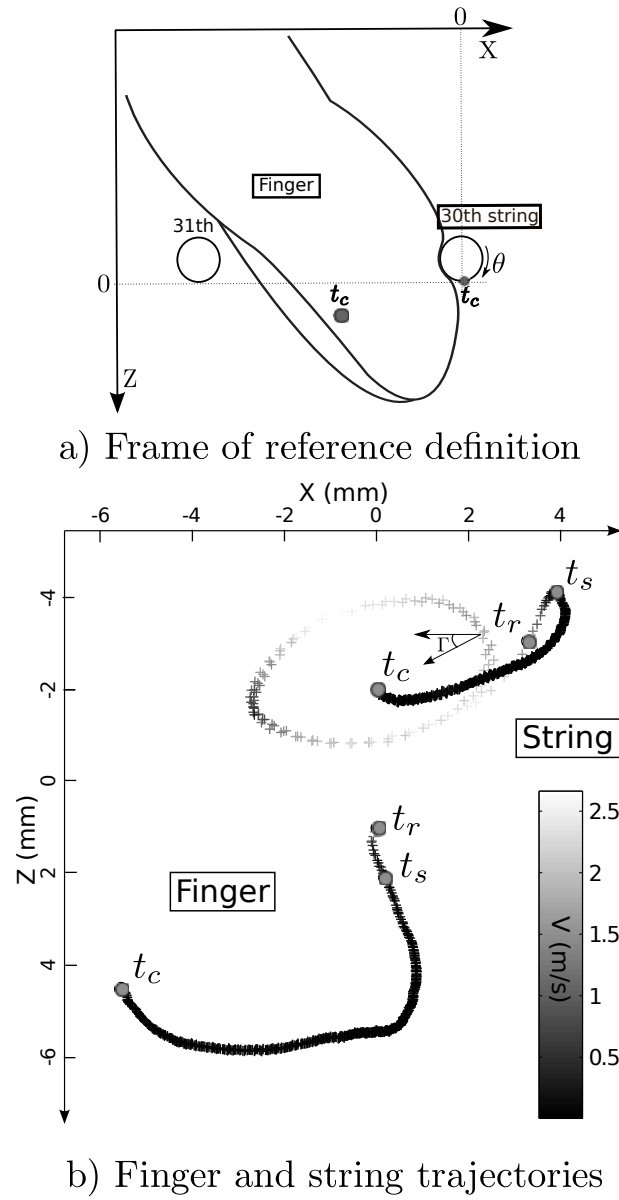


FIGURE 5.4 – Finger trajectory during the plucking and string trajectory during both, plucking and free oscillations, in the (x, z) plane. a) Frame of reference definition. b) Finger and string trajectories.

5.3.3 Initial conditions shape and velocity

Using the finger and string trajectories, we can define descriptors of the initial conditions of the string vibrations : D_{t_r} and V_{t_r} are the distance between the string at t_r and its rest position, and the velocity of the string at t_r , respectively.

Experimental finger and string trajectories presented previously in Fig. 5.4(b) describe the movement of one point of the string during plucking. Even if the shape of the string at each instant is not directly known, the displacement of each point of the string during the sticking phase ($\vec{r}(y, t) \forall t \in [t_c; t_s]$) can be computed. Indeed, assuming that we have a flexible string of uniform linear density ρ_l , stretched to a tension T fixed at its ends, the transverse vibrations in x and z directions are [Fletcher 1976; Morse 1948; Chaigne and Kergomard 2008]

$$\vec{r}(y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\alpha_n t} \left(A_n \vec{\Phi}_n \cos(2\pi f_n t + \Psi_n) + B_n \vec{\Phi}_n \sin(2\pi f_n t + \Psi_n) \right), \quad (5.1)$$

where t is the time, $f_n = \frac{nc}{2L}$ are the eigen-frequencies (with the assumption that they are equal for the two directions), α_n is the damping coefficient, $\Psi_n = \text{atan}(\frac{\alpha}{\omega_n})$, and $\vec{\Phi}_n$ is the modal deflection. A_n and B_n are modal amplitudes that depend on the initial conditions :

$$A_n = \frac{2x(y_0, 0) \sin(k_n y_0)}{k_n^2 y_0 (L - y_0)}, \quad (5.2)$$

and

$$B_n = \frac{2\dot{x}(y_0, 0) \sin(k_n y_0)}{k_n^3 y_0 (L - y_0) c}. \quad (5.3)$$

The initial shape ($x(y, 0)$) and velocity ($\dot{x}(y, 0)$) of the string depend on the plucking. It is usually assumed [Fletcher and Rossing 1998] that the initial velocity of a string plucked with a thin plectrum is negligible ($B_n = 0$) while the initial shape is a triangle ($A_n \neq 0$) :

$$\vec{r}(y, t) = \begin{cases} \frac{y}{y_0} (x_s(t) \vec{e}_x + z_s(t) \vec{e}_z) & \forall y \in [0; y_0], \\ \frac{L-y}{L-y_0} (x_s(t) \vec{e}_x + z_s(t) \vec{e}_z) & \forall y \in [y_0; L], \end{cases} \quad (5.4)$$

where y_0 is the plucking point along the length of the string.

5.3.4 Initial angle of polarization

The initial polarization (denoted Γ in Fig. 5.4) has a strong influence on the produced sound [Pavlidou 1997; Lambourg and Chaigne 1993; Ori]. Indeed, it relates to the coupling between the two vibration polarizations of the string. Using the string trajectory, the initial angle of polarization can be computed. To evaluate this angle, the trajectory of the string during its first free oscillations is fitted to an ellipse. Then, the initial angle of polarization is evaluated as the angle of the long axis from $\vec{e}_x$, that is to say from the strings plane.

5.3.5 Energy

During the sticking phase, the harpist adds energy to the string. Assuming that the finger/string system is moving slowly, as compared to the characteristic movement of the string oscillations, the kinetic and potential energies (respectively noted E_k and E_p) are computed as follows [Morse 1948] :

$$E_k = \frac{\rho_l}{2} \left(\int_0^L r_x \left(\frac{\partial r_x}{\partial t} \right)^2 dx + \int_0^L r_z \left(\frac{\partial r_z}{\partial t} \right)^2 dz \right) + \frac{1}{2} I \int_{t_c}^{t_s} \dot{\theta}(t)^2 dt, \quad (5.5)$$

$$E_p = -\frac{T}{2} \left(\int_0^L r_x \frac{\partial^2 r_x}{\partial x^2} dx + \int_0^L r_z \frac{\partial^2 r_z}{\partial z^2} dz \right) + \int_{t_c}^{t_s} M \theta(t) dt, \quad (5.6)$$

where r_x and r_z are the projections along $\vec{e}_x$ and $\vec{e}_z$ of the transverse displacement of the string as described in equation 5.4, $\theta(t)$ is the angular deviation applied to the string, $I = \frac{\rho_l L d^2}{8}$ is the moment of inertia with d the string diameter, and M is the torque applied to the string.

These computations can be made at the end of the slipping phase, neglecting the rotational kinetic and potential energies, in other words at the beginning of the strings oscillations using the previous equations 5.5 and 5.6. In this case, the transverse displacement of the string is computed with the equation 5.1 and considering the general case [Morse 1948] : $A_n \neq 0$ and $B_n \neq 0$.

In order to compare the potential and kinetic energy contributions to the global energy transferred by the harpist to the string during each phase, the following dimensionless descriptors are defined :

$$R_{e_k} = \frac{E_k}{E_k + E_p}; \quad R_{e_p} = \frac{E_p}{E_k + E_p}, \quad (5.7)$$

where R_{e_k} and R_{e_p} are the ratio of kinetic and potential energy to the total energy brought by the harpist during the studied phase, respectively.

5.3.6 Soundboard vibrations

Plucking position

As the musicians muffled the harp's strings in their own way, temporal signals all end differently. Therefore, we only studied the first 100 ms of the vibration signals. Furthermore, as soundboard vibrations are studied when the modal behavior is established, we assume that this phase begins when the signal energy reaches its maximum value.

Thus, the spectrum of each pluck was averaged over 100 ms of the soundboard vibration signal. This allowed the estimation of the position y_0 where each string is plucked. The origin of the string was chosen as the position at which it is attached to the soundboard. y_0 was estimated, following [Traube and Smith III 2000], by minimizing the difference between the ideal string magnitude spectrum and the computed spectrum. The position a string is plucked at is indeed of prime importance regarding the spectral composition [Fletcher 1977]. To compare

this descriptor regardless of the string length, a dimensionless indicator of the plucking position is defined :

$$R_{y_0} = \frac{y_0}{L}. \quad (5.8)$$

Spatial width of the excitation

The harp string is plucked by a finger of non-negligible width. The displacement of a string plucked with a plectrum of width Δ is given by [Morse 1948; Chaigne and Kergomard 2008] :

$$x(y, t) = 2F\Delta \sum_n \frac{\sin(k_n y) \sin(k_n y_0)}{m_n} \frac{\sin(\omega_n t)}{\omega_n} \frac{\sin k_n \Delta}{k_n \Delta}, \quad (5.9)$$

where F denotes the amplitude of the applied force and m_n the modal mass of the n th mode. Equation 5.10 means that the finite width of the excitation acts as a low-pass filter on the vibratory response of the punctual case. The cutoff frequency of this filter is [Chaigne and Kergomard 2008]

$$f_c = \frac{c}{2\Delta}, \quad (5.10)$$

where c is the transverse wave propagation velocity along the string. In the present study, Δ is assumed to be equal to the width of the finger at the point of contact with the string.

5.4 Discussion

5.4.1 Characteristics of the harp string plucking

Finger and string movements

In this section, we focus on the finger trajectory to highlight common behaviors or particular characteristics of each performer movement. Fig. 5.4 represents an example of finger/string displacements while plucking the harp. Fig. 5.5 shows finger trajectories of notes played through an arpeggio sequence by two harpists (H_4 and H_5). These two sequences were chosen because of their relevance in relation to the entire set of measured trajectories. The most interesting result is that harp plucking movements are particularly complicated and specific to each performer. Thus, for a given musical context, every harpist performs her/his own kind of finger movement, which is repeatable. During the interaction, the finger is mostly pulling the string outwards. However, after displacing the string to its maximum position according to the plucking plane $(\vec{e}_x, \vec{e}_z)$, a phenomenon appears in varying proportions according to the player and the technique used (chord or arpeggio) : the harpist slightly relaxes his grip on the string. This phenomenon appears for instance clearly for the harpist H_5 (Fig. 5.5) and the two chord trajectories in the Fig. 5.6. When the string is relaxed by the finger, its direction is hence modified and its distance from rest position tends to decrease.

Fig. 5.6 shows two finger trajectories by musical context (combinations of techniques and fingering), for a single harpist (H_4). The different shapes confirm the repeatability of the movement for a given musical context. Furthermore, depending on the musical context, these trajectories

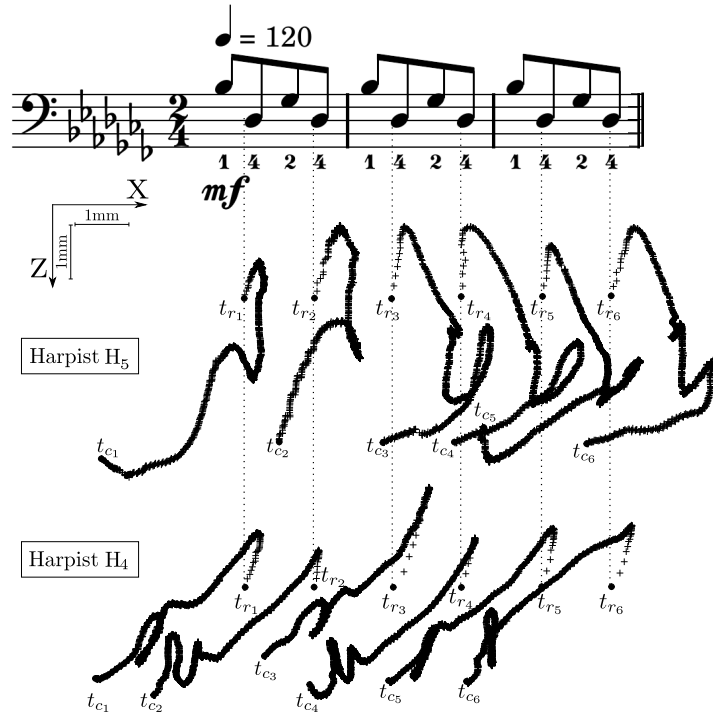


FIGURE 5.5 – Repeatability and characteristics of finger movement for two harpists performing an arpeggio sequence with the annular finger. t_c and t_r correspond to the beginning and the end of the finger/string contact.

may have more or less complex shapes (Fig. 5.6 : arpeggio-annular example vs. figure 5.6 : chord-annular example). It is commonly observed that the more complex trajectories are obtained for arpeggio performances. The reason is that the finger/string interaction lasts longer here than in the case of chord performances, and the musician has more time to adjust the action of his finger on the string before releasing it.

Finally, using the string trajectories for each plucking action, we can compute the force applied by the finger on the string, as described by classical plucked string theory [Fletcher and Rossing 1998]. Accordingly (cf. Fig. 5.5 or 5.6), the force will first rise during the sticking phase, reach its maximum at the onset of the slipping phase, and then decrease during the slipping phase. The shape of the curve representing the plucking force has a similar behavior to those measured on a harpsichord [Giordano and Winans II 1999]. Nevertheless, the measured order of magnitude for a plectrum (1.5 N) is much lower than the force magnitude measured for the finger in the present study (up to 15 N).

Phase durations

The plucking action is mainly composed of two phases : the sticking and the slipping phases (defined Sec. 5.3.1). The two phases have very disproportionate durations (about 250 ms versus 3 ms) which are described in Tabs. 5.2 and 5.3. The presented durations are measured at a fixed dynamic level (*mezzo-forte* for chords and arpeggios) and *tempi* (60 beats per minute (bpm) for

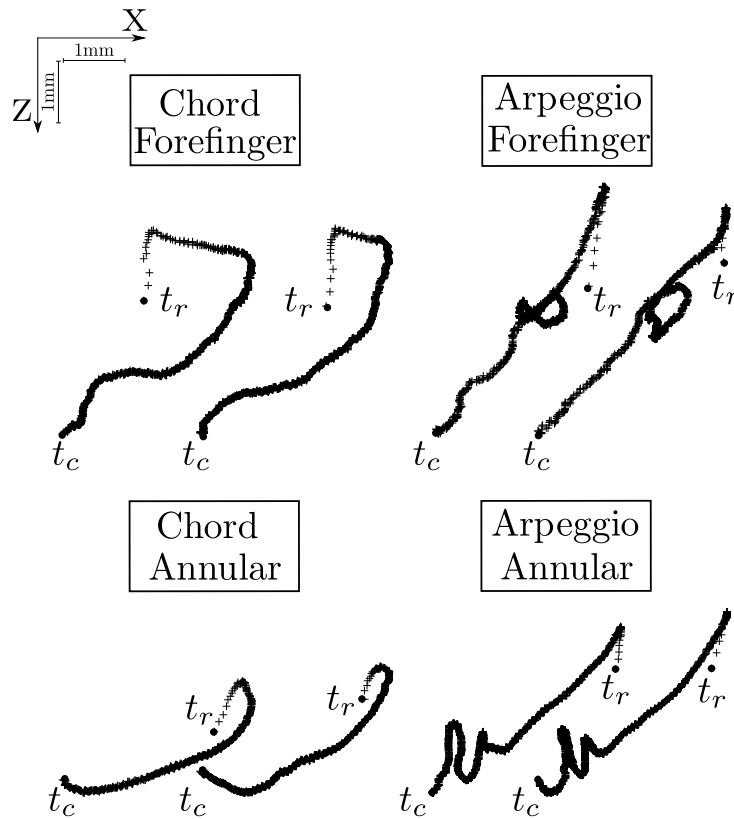


FIGURE 5.6 – Illustration of the variety of finger movements during the harp plucking for one harpist. t_c and t_r correspond to the beginning and the end of the finger/string contact.

Sticking phase duration (ms)				
	Forefinger		Annular	
	Chord	Arpeggio	Chord	Arpeggio
H_1	161 $\pm$ 4		147 $\pm$ 18	
H_2	125 $\pm$ 26	270 $\pm$ 25	116 $\pm$ 2	286 $\pm$ 25
H_3	98 $\pm$ 14	213 $\pm$ 39	114 $\pm$ 13	233 $\pm$ 18
H_4	231 $\pm$ 12	210 $\pm$ 33	158 $\pm$ 22	248 $\pm$ 14
H_5	146 $\pm$ 13	252 $\pm$ 6	146 $\pm$ 11	241 $\pm$ 32
H_6	73 $\pm$ 10	219 $\pm$ 29	56 $\pm$ 9	230 $\pm$ 32
H_7	199 $\pm$ 6	250 $\pm$ 18	176 $\pm$ 25	322 $\pm$ 9
H_8	152 $\pm$ 36	273 $\pm$ 21	163 $\pm$ 35	253 $\pm$ 26
H_9		402 $\pm$ 32	163 $\pm$ 28	431 $\pm$ 32
H_{10}	111 $\pm$ 29	180 $\pm$ 28	106 $\pm$ 18	220 $\pm$ 21

TABLE 5.2 – Sticking phase durations for each harpist and musical context. The mean is computed on three and six plucking actions respectively for chord and arpeggio at each fingering. The reported uncertainty represents a 95% confidence interval

chords and 120 bpm for arpeggios). Each harpist was asked to perform chords and arpeggios with the forefinger and the annular finger.

Tables 5.2 and 5.3 report the measured phase durations. The small uncertainties, of about 10%, tend to indicate that the measurement protocol is reliable. These phase durations appear to be specific to the performer. Moreover, regarding the musical context, while the finger/string interaction duration for an arpeggio matches with the entire amount of time available before the next note (250 ms), the duration of this interaction for a chord corresponds to a quarter of the available duration before the next chord (500 ms). On the one hand, to play an arpeggio in classical harp technique, performing an arpeggio requires that the fingers are in contact with the strings whereas in a chord this is not the case. Performing an arpeggio requires therefore a longer musical preparation than a chord. Note that some boxes are empty because some experimental data are missing or because of some post-processing problems.

The durations of the sticking and the slipping phases which have been measured for the harpsichord, hence plucked with a plectrum, are respectively about 150 ms and 8 ms [Giordano and Winans II 1999]. This slipping phase duration is about two times higher than our measurements on the concert harp. Nevertheless, the sticking phase lasts as long as those measured for a chord performance and therefore about two times lower than these measured for an arpeggio sequence. For guitars, which are plucked with the fingertip like the concert harp, the plucking duration depends on the loudness of the produced sound : the higher the loudness, the longer the plucking. This duration is estimated between 84 ms and 170 ms, with a slipping phase lasting around 0.5 ms [Pavlidou 1997]. Finally, to simulate the guitar plucking, typical values chosen to obtain a satisfying sound synthesis [Derveaux et al. 2003] are about 0.4 ms for the slipping phase and 15 ms for the sticking phase. These estimations show that the durations measured for

Slipping phase duration (ms)				
	Forefinger		Annular	
	Chord	Arpeggio	Chord	Arpeggio
H_1	2.9 ± 1.1		3.0 ± 0.7	
H_2	1.4 ± 0.2	1.8 ± 1.1	1.2 ± 0.4	1.6 ± 0.5
H_3	2.5 ± 0.4	3.0 ± 0.4	3.7 ± 0.5	2.9 ± 0.5
H_4	2.6 ± 0.2	3.0 ± 0.4	3.9 ± 0.7	3.4 ± 0.7
H_5	2.0 ± 0.4	4.3 ± 2.0	3.1 ± 0.7	4.2 ± 0.9
H_6	1.9 ± 0.6	2.5 ± 0.3	2.5 ± 0.7	2.5 ± 0.6
H_7	3.2 ± 1.2	3.1 ± 1.2	1.9 ± 0.5	6.1 ± 0.8
H_8	2.6 ± 0.8	3.7 ± 0.7	2.6 ± 0.3	3.5 ± 0.7
H_9		3.7 ± 1.3	4.4 ± 1.3	5.1 ± 1.3
H_{10}	3.0 ± 1.9	3.4 ± 0.6	2.9 ± 0.8	2.8 ± 0.4

TABLE 5.3 – Slipping phase durations for each harpist and musical context. The mean is computed on three and six plucking actions respectively for chord and arpeggio at each fingering. The reported uncertainty represents a 95% confidence interval

harp plucking are closer to the harpsichord case for the sticking phase, while they are closer to the guitar case for the slipping phase. However, the data presented in this paper are restricted to one string on the harp. Since the diameter, the length and the tension of the strings vary along the tessitura of the instrument together with the radiation of the instrument, the players may adjust their plucking, resulting in different phase durations according to the string played.

Maximum angular deviation applied to the string

When the finger and the string are in contact, we observe experimentally the angular deviation of the string. To quantify this, the maximal value of the angular deviation of the string during the sticking phase was measured for each filmed plucking. Note that during the slipping phase, this angle monotonically decreases. The obtained values are presented in Tab. 5.4.

Tab. 5.4 shows the maximum angular deviation applied by the finger to the string during the sticking phase. Again, some boxes are empty because of post-processing issues. In the reported values, the uncertainty of the measurements is about 19 %. The maximum angular deviation of the string produced by the finger is not negligible : the mean rotation is indeed in a range of values between 7° and 82° . Each harpist appears to have a repeatable behavior, which is specific to the individual. Once again, two groups are highlighted : chord and arpeggio sequences. Different fingering does not provide any difference (44° vs. 45° on average). The rotation applied by the finger during a chord sequence is slightly lower than during an arpeggio sequence : 39° vs. 45° on average. This phenomenon can be explained in the same way as before : performing an arpeggio implies more preparation time and thus more control of the string, unlike that of performing a chord. This seems to indicate that the control of the string during the sticking phase, and the

	Maximum angular deviation (degrees)			
	Forefinger		Annular	
	Chord	Arpeggio	Chord	Arpeggio
H_1	82 ± 10		66 ± 8	
H_2	43 ± 12	70 ± 9	35 ± 6	54 ± 11
H_3	53 ± 8	45 ± 13	47 ± 8	46 ± 7
H_4	66 ± 2	39 ± 18	44 ± 11	63 ± 9
H_5	25 ± 4	53 ± 6	24 ± 4	48 ± 9
H_6		38 ± 18		34 ± 8
H_7	32 ± 6	43 ± 9	35 ± 1.6	57 ± 5
H_8	22 ± 4	48 ± 7	22 ± 5	34 ± 7
H_9				
H_{10}	20 ± 5	11 ± 3	15 ± 3.2	44 ± 2

TABLE 5.4 – Maximum angular deviation applied to the string during the sticking phase. The mean is computed on five and seven plucking actions respectively for chord and arpeggio. The reported uncertainty represents a 95% confidence interval

way it is released, are important control parameters used by musicians : harp plucking appears here much more complex than the simple pulling out as described by the classical plucked string theory. Furthermore, a second tendency seems to appear with the two musicians who practice their instrument (H_8 and H_{10}) the least as compared to the others, who practice more regularly : the former provide less rotation to the string than the latter. This may mean that they have less control of the strings than the regular performers, or that the skin of their finger has different properties (eg. friction coefficient).

Plucking position

Fig. 5.7 shows dimensionless plucking position R_{y_0} which are computed for every performer plucking each of the four studied notes (Tab. 5.1) in a isolated way, with three different fingers (right hand thumb, forefinger and annular finger). Note that markers disposed on the 30th string for the trajectory study has been removed for these vibration measurements. An interesting first result is that there is no important variability in the plucking position of each fingering. Surprisingly, the measured differences between annular finger, forefinger and thumb does indeed not exceed 1% of the string length. Therefore, to make reading easier, values computed on all three fingers are presented here without any distinction. The dimensionless plucking position values are computed over about 290 observations.

Harpists pluck the string between about one third and two fifths of the distance from the soundboard to the neck. During the measurement session, the plucking position was directly estimated based on the harpist's hand position. Values obtained in this way and measurements reported in the litterature [Le Carrou et al. 2010] validate the computed values presented in Fig.

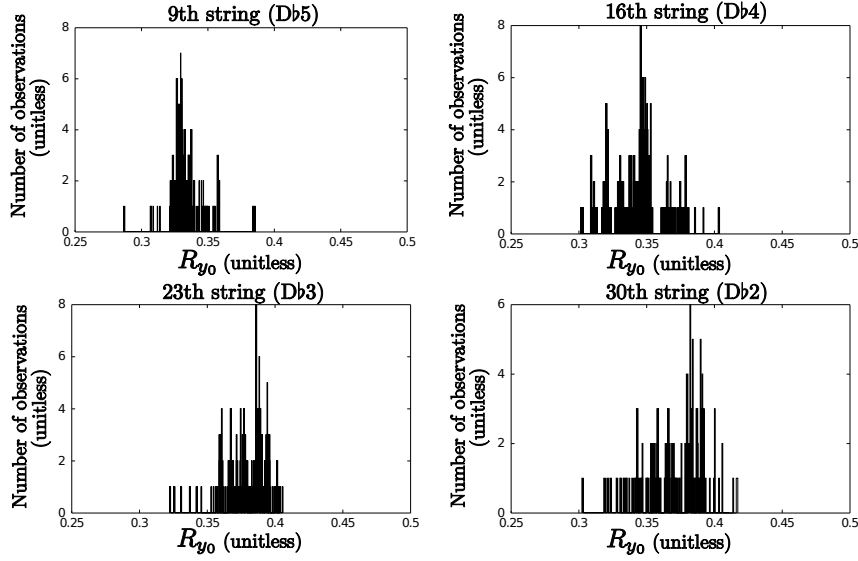


FIGURE 5.7 – Dimensionless plucking position R_{y0} measured on 9 harpists for the 9th, 16th, 23th and 30th strings, for 290 observations

5.7. Furthermore, the plucking position rises slightly with the octave number. Even if there may be some justification to this rise from the global balance of the sound spectra over the tessitura, we expect this evolution to be mostly due to morphological reasons. Indeed, the further the string is from the performer, the more the arm is held out making hand positioning more difficult. Moreover, the variance also increases with the octave number because of the extension of the length of the string at lower frequencies. The computation of dimensionless plucking position leads to the conclusion that there is no significant difference between musicians concerning the position at which they pluck a harp string. Therefore, this parameter alone does not seem to play an important role in the acoustical signature of the player. However, these measurements validate our experimental protocol which consists of observing finger/string movement at an imposed position on the string.

Spatial width of the excitation

Tab. 5.5 presents the cutoff frequency values computed for each studied string, using equation 5.10. According to repeated plucking observations, the maximum width of the finger in contact with the string Δ is estimated at about 2 cm. The computed cutoff frequencies are high enough that we can still assume a punctual string excitation. In line with theory [Chaigne and Kergomard 2008], the low-pass filter resulting from the excitation's width is therefore negligible.

	Freq (Hz)	f_c (Hz)	Harmonic number
9th, D$\flat$5	1109	9760	8
16th, D$\flat$4	554.4	8593	15
23th, D$\flat$3	277.2	7512	27
30th, D$\flat$2	138.6	6757	52

TABLE 5.5 – Cutoff frequencies for each string under study, implied by a finite excitation width, estimated at 2 cm

5.4.2 Characteristics of the free oscillation

Initial shape and velocity

The classical description of a plucked string instrument assumes that the string is released without significant velocity [Fletcher and Rossing 1998; Morse 1948]. In other words, the mechanical energy of the string is only composed of potential energy at the release instant t_r . Using the kinetic and potential ratio defined in equation 5.7, the composition of the string energy at the end of the sticking phase is computed; it is mostly composed of potential energy without any difference between fingerings or techniques. This means the sticking phase matches with the classical plucked string description. Fig. 5.8 presents the string initial conditions, for all the harpists. While Fig. 5.8(a) concerns chord sequences for all fingerings, arpeggios are presented in Fig. 5.8(b). The initial velocity of the string is not negligible and seems to be correlated with the initial displacement : the musician cannot provide a significant initial velocity without a significant displacement, and similarly a weak velocity cannot be associated to an important displacement. Moreover, the initial conditions of the string vibration appear to have a different behavior for chords and for arpeggio sequences. These two different playing techniques lead to different initial shape and velocity conditions of the string. Furthermore, it appears that each musician plucks the string in a characteristic area of the (D_{t_r}, V_{t_r}) plane, with a higher uncertainty for arpeggio than chord sequences. The initial displacement of the string is particularly dependent on the musician regardless of whether she/he is professional or amateur, particularly in the chord sequences. As shown Fig. 5.8(a), $H_{1...10}$ are grouped in the same area for the two types of fingers. This phenomenon is mostly observable for chord sequences. The uncertainty in the initial velocity is higher than in the initial displacement. As this velocity component mostly appears during the slipping phase, this seems to indicate that, unsurprisingly, string control is more difficult in the slipping phase than during the sticking phase. Fig. 5.8 also illustrates the different initial conditions of the string according to the fingering used by the musician. Fig. 5.8(a) shows that the behavior of the string plucked by the annular finger is usually close to the values for the forefinger. This is for instance the case with harpists H_5 or H_7 . Concerning arpeggio sequences, except for H_6 or H_4 , the same phenomenon appears. Therefore, the initial shape and velocity of the string vibration does not seem to depend much on the fingering. The energetic composition of the string at the release, according to equations 5.7, can be computed using the initial conditions presented in Fig. 5.8. Considering average values of measured velocity

	Initial angle of attack (°)			
	Forefinger		Annular	
	Chord	Arpeggio	Chord	Arpeggio
H_1	44 ± 2		27 ± 5	
H_2	38 ± 5	25 ± 7	28 ± 11	26 ± 8
H_3	32 ± 5	7 ± 3	15 ± 0.5	18 ± 9
H_4	44 ± 0.6	37 ± 2	21 ± 6	25 ± 3
H_5		41.2 ± 2	23 ± 9	28 ± 9
H_6	42 ± 4	38 ± 5	41 ± 4	33 ± 6
H_7	41 ± 1.5	40 ± 3	33 ± 11	38 ± 2
H_8	25 ± 12	35 ± 3	17 ± 18	43 ± 1
H_9		23 ± 6	13 ± 3	14 ± 5
H_{10}	32 ± 5	22 ± 3	18 ± 7	21 ± 2

TABLE 5.6 – Initial angle of attack for each musician. The mean is computed on five and seven plucking actions respectively for chord and arpeggio. The reported uncertainty is an uncertainty with a 95% confidence interval

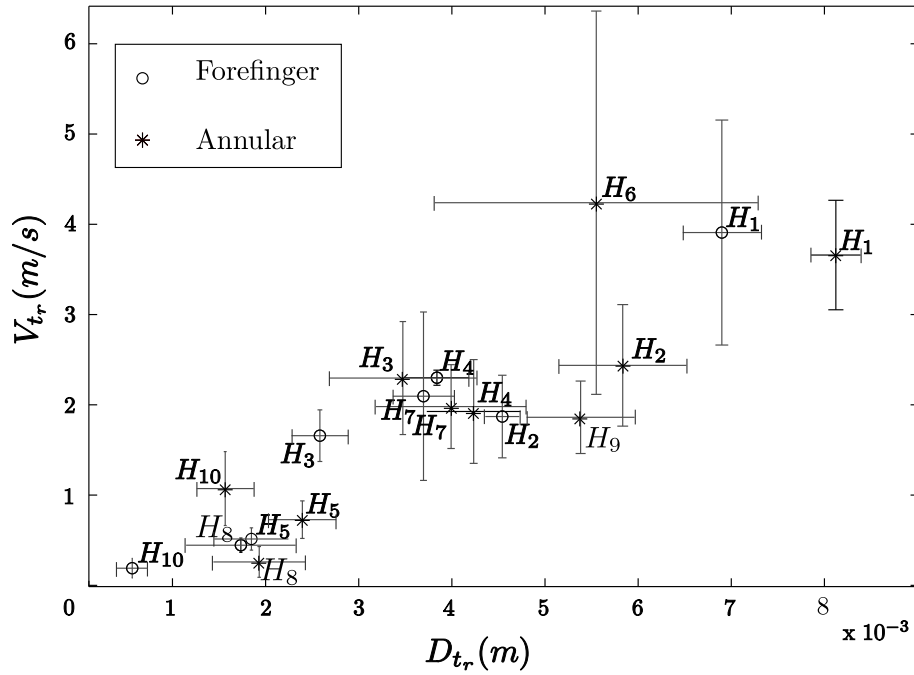
and displacement ($D_{t_r} = 4mm$ and $V_{t_r} = 2m/s$), computed potential and kinetic energy are about 1 mJ and 0.4 mJ, respectively. Regardless of the chosen velocity and displacement, for instance extreme values ($D_{t_r} = 0.5mm$ et $V_{t_r} = 0.2m/s$ and $D_{t_r} = 7mm$ et $V_{t_r} = 5m/s$), the string owns about 15% and 37% of kinetic energy at the end of the slipping phase, respectively. The initial conditions of the string vibrations are therefore mainly composed of displacement but the velocity component is not negligible.

Initial angle of polarization

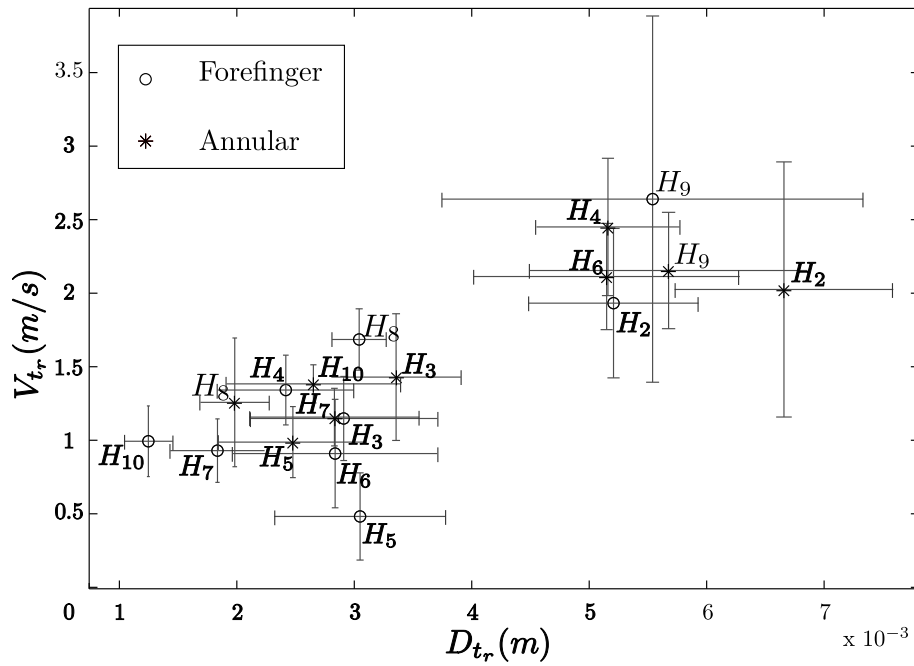
Tab. 5.6 presents the initial angle of polarization, for each of the ten musicians, for different musical contexts, and for the forefinger and the annular finger. On the reported values, the uncertainty of the measurements is about 15 %. The estimations of the initial angle of attack are between 7° and 43° . Thanks to this large range of values and the reasonable uncertainties observed, this descriptor allows us to distinguish harp pluckings by different musicians. It means the musician controls the string precisely during the slipping phase to release it with the desired direction. These differences may also be explained by morphological differences. Regarding the musical context (arpeggio or chord), we did not observe any particular trend. However, it appears that the fingering has a non-negligible significance. The initial angle of attack is indeed slightly higher when the string is released by a forefinger than by an annular finger.

Vibration spectra

As explained in Sec. 5.1, we assume each musician produces her/his own particular sound at the individual note level. In other words, this means they set their instrument into vibration in



a) Chord sequences



b) Arpeggio sequences

FIGURE 5.8 – Initial conditions of the string vibrations for different harpists, musical context and fingering. The mean is computed on five and seven plucking actions respectively for chord and arpeggio. The reported uncertainty represents a 95% confidence interval. a) Chord sequences. b) Arpeggio sequences.

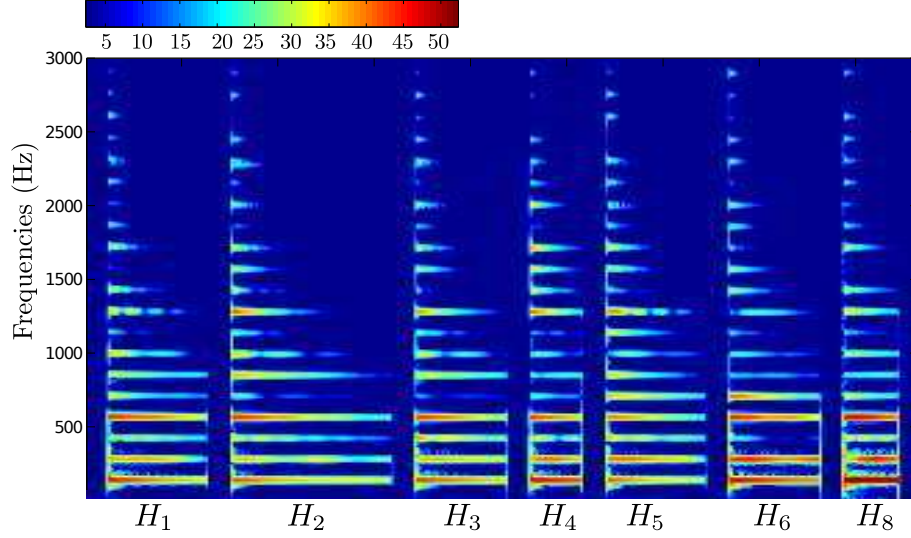


FIGURE 5.9 – Spectrograms computed on isolated Db2 with forefinger for different harpists. (Color online)

a way that is particular to them. Hence, just listening to isolated notes performed by different harpists should be sufficient to characterize the player's acoustical signature. For instance, we can hear that, while some of them seem to pluck the string with their fingertip, others seem to pluck the string close to their fingernail. Furthermore, the brightness of the produced sound varies from one musician to another.

To illustrate this phenomenon, Fig. 5.9 presents spectrograms computed for harpists playing an isolated Db2 with their right forefinger.

As the spectral effects of the plucking position has not been removed, the spectrograms exhibit some differences between one musician and another which are related to the plucking position. However, this does not explain all observable differences. The spectral mode decreasing is for instance higher for harpist H_1 than H_4 . Significant differences across musicians can be observed especially in the highest harmonics, as seen e.g. in the amplitudes of the 5th (major third), 9th (major tone), 11th and 12th (fifth) harmonics.

The previously discussed differences between harpists regarding initial conditions of the string vibration and plucking phases are hence related to the particular radiated sound : as the harpist does not have any mechanical action on the vibrating structure, it means that the initial shape and velocity of the string contain an important part of the musician acoustical signature.

5.5 Conclusion

This article has presented an experimental study of harp plucking. A well-controlled measurement setup allowed the estimation of the finger and string trajectories and the string deviation, during plucking. We also had access to the soundboard vibrations during the free oscillation of the string.

Measurements were performed on ten musicians in several musical contexts (techniques and fingering). They show different behavior, depending mostly on the performer and the technique used. More precisely, each musician provides specific but highly reproducible initial displacement, velocity and rotation to the string. This means that the musician adjusts her/his control of the string in order to release it at the desired position. This string control is also dependent on the technique (arpeggio vs chord) : while performing an arpeggio, the string is held by the finger longer than for a chord. In this way, the former is more controlled than the latter, which leads for instance to a more significant maximum angular deviation. Furthermore, following the decomposition of the plucking into temporal phases (approach, sticking, slipping, free oscillation), the initial conditions of the string vibration does not match the classical description for plucked string instruments (significant displacement with negligible velocity) because of the slipping phase where string velocity increases. The kinetic energy component of the string at the beginning of its free oscillation reaches between about 15 to 37 % of the global energy brought to the string by the finger during the whole plucking action. Thus the control issue leads to the idea that the harpist's contribution during the sticking phase is mostly dynamic while musical skill governs the slipping phase.

The slipping phase therefore requires more attention. It is indeed the transition phase between the classical plucking description (the sticking phase here) and the free oscillation of the string. During this phase, the string slips on the finger. It behaves according to the friction between the string and the finger, which is obviously specific to each harpist. Further work is still necessary to investigate more deeply the plucking of the harp. The finger and string trajectories discussed in this paper are restricted to one string. The analysis should be broadened to the plucking of strings at different positions in the harp tessitura. Furthermore, the study can be extended using soundboard vibrations of each performance to define descriptors related to the produced sound according to the plucking action. Although the present study does not deal with the produced sound, previous study[Le Carrou et al. 2010] has shown the impact of the harpist on the radiated sound. This study has to be extended therefore to the radiated sound and not only to the soundboard vibrations. Moreover, a mechanical model of the finger and the string interaction, combined with the measured trajectories, could be helpful in determining characteristic parameters of the plucking action. Finally, a well-controlled mechanical excitation system[Smit et al. 2010] could be useful to characterize the influence of our descriptors of harp plucking.

Troisième partie

Modélisation de l'interaction doigt/corde

Avant-propos

L'étude expérimentale de l'interaction entre le harpiste et son instrument présentée dans la partie précédente a mis en avant la complexité des gestes musicaux mis en œuvre lors de l'interprétation d'une pièce. La spécificité du son et des gestes produits, notamment celui du pincement de la corde, ont également été soulignés. Cette nouvelle partie vise à apporter des éléments de réponse à la problématique des différences sonores perceptibles entre harpistes à la simple mise en vibration d'une corde. Pour cela, nous cherchons à identifier et à extraire les paramètres mécaniques pertinents de l'interaction entre le harpiste et son instrument, réduite au pincement d'une corde, et à en quantifier l'impact sur la production sonore. La mise en place d'un doigt robotisé reproduisant le pincement d'un harpiste est effectuée dans le but de valider la compréhension du pincement issue du chapitre 5. Dans un second temps, un modèle mécanique de l'interaction entre le doigt et la corde de harpe est proposé. Le doigt robotisé est alors utile pour valider les paramètres mécaniques de ce modèle. La pertinence de celui-ci est ensuite évaluée dans le cas de pincements effectués par des harpistes en situation de jeu réaliste. Finalement, une étude paramétrique est faite afin de préciser les relations existantes entre les paramètres mécaniques gouvernant l'interaction doigt/corde et la production sonore.

Le chapitre 6 se présente sous la forme d'un acte de la conférence *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* accepté pour publication. Un doigt artificiel dédié à pincer des cordes a été développé en collaboration avec Marie-Aude Vitrani, Maître de conférences à l'ISIR (Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique), à l'Université Pierre et Marie Curie. Il s'agit d'un robot simple, classiquement utilisé en travaux pratiques, composé de deux bras montés en série, actionnés par deux moteurs en rotation, et asservi en déplacement. Il a été dimensionné à la présente étude au cours d'un stage de fin d'étude d'ingénieur [Billout 2011]. Il est à noter que la complexité du pincement d'un harpiste, et notamment les vitesses et efforts en jeu simultanément (jusqu'à 1.5m/s et 15N) constitue un véritable défi dans le domaine de la robotique, particulièrement du point de vue du contrôle. Une photo de ce doigt robotisé installé sur notre harpe de concert est présentée figure 5.10. Celui-ci constitue un outil d'excitation de l'instrument parfaitement répétable et paramétrable. Sa trajectoire est régie par une consigne en déplacement qui peut être directement issue de mesures sur musiciens, ou bien créée par l'utilisateur. Le matériau de la terminaison de ce doigt est d'une importance considérable vis-à-vis de la qualité de la production sonore. C'est pourquoi six embouts en silicone, de formes et de duretés variables, ont été testés. La figure 5.11 propose une photographie de l'ensemble du montage mis en place autour de la harpe. La validation de ce doigt artificiel et la détermination



FIGURE 5.10 – Photographie du doigt artificiel mis en place sur une harpe de concert afin d’en pincer les cordes.

du type de matériau le mieux adapté ont été effectuées via une étude paramétrique fondée sur la confrontation des pincements produits par le doigt artificiel et par une harpiste. Pour ce faire, les mouvements effectués par le bout du doigt, mais aussi par la corde, ainsi que la vibration de la table d’harmonie de l’instrument ont été mesurés. Un jeu de descripteurs de ces données a ainsi été défini. Cette étude paramétrique a permis de valider le robot mis en place, les pincements reproduits étant effectivement comparables à ceux d’un harpiste du point de vue vibratoire.

La seconde étude de cette partie (chapitre 7) prend également la forme d’un article soumis pour publication au *Journal of the Acoustical Society of America*. Il consiste en une suite de l’article [Chadefaux et al. 2012c] présenté au chapitre 5 du présent manuscrit. Une modélisation mécanique du pincement d’une corde de harpe y est en effet proposée. La contribution de cette étude en regard de modèles d’interaction doigt-corde d’ores et déjà existants [Pavlidou 1997; Evangelista 2010; Le Carrou et al. 2007b 2008] est triple. En premier lieu, la modélisation du doigt de l’instrumentiste est issue de la littérature de la mécanique du contact humain, permettant une description plus réaliste que jusqu’à présent de son comportement viscoélastique en compression sur la corde. Le choix du modèle adéquat est en partie présenté au sein de ce chapitre. Son complément est proposé à l’annexe E. De plus, sachant que le déroulement du pincement peut être assimilé à la succession de deux phases temporelles gouvernées par des phénomènes physiques distincts, sa modélisation est également scindée en deux parties, comme l’illustre la figure 5.12. Les paramètres mécaniques gouvernant la modélisation proposée sont estimés à partir de la base de données relative au pincement collectée lors des études présentées aux chapitres 5 et 6. Les paramètres mécaniques décrivant chacun de ces 170 pincements ont été estimés, fournissant ainsi des gammes de valeurs réalistes pour chacun d’entre eux. Ceux-ci sont divisés en deux groupes, les paramètres mécaniques intrinsèques au pincement, et ceux liés au contrôle de l’instrumentiste. Une étude paramétrique a permis de mettre en exergue



FIGURE 5.11 – Photographie du montage expérimental lors de l'évaluation des performances du doigt artificiel.

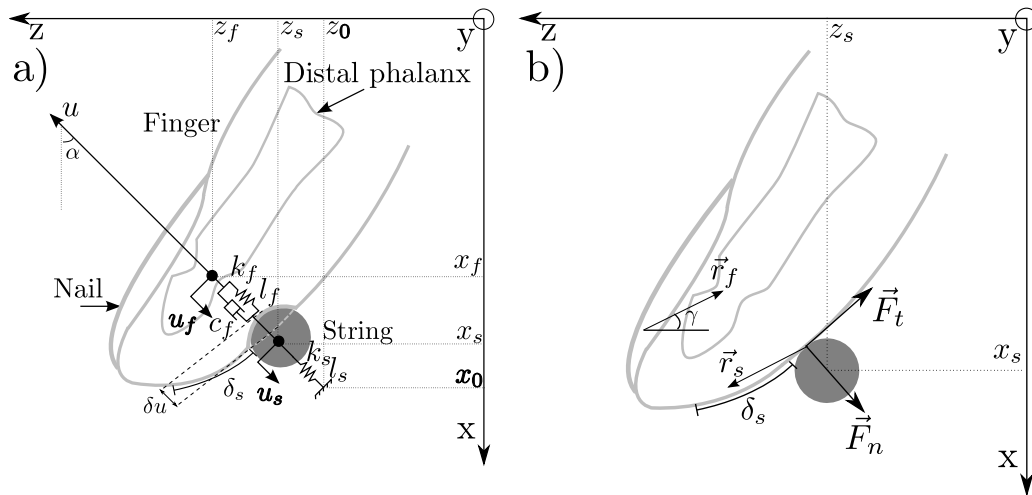


FIGURE 5.12 – Modélisation proposée de l'interaction doigt-corde pendant les deux phases du pincement que sont a) la phase d'accroche et b) la phase de glissement. Les déplacements de la phalange et de la corde sont notés (x_f, z_f) et (x_s, z_s) .

les paramètres influant de manière notable sur les oscillations libres de la corde, ergo sur le son finalement rayonné. Les paramètres que contrôle directement l'instrumentiste en pinçant la corde, c'est-à-dire la force qu'il lui applique F_n , la distance qu'il laisse entre elle et le bout de son doigt δ_s , mais aussi le chemin parcouru $x_s(t_c; t_r)$, $z_s(t_c; t_r)$, ont une importance considérable sur le son produit. Ils influent effectivement grandement sur les conditions initiales des oscillations libres de la corde. D'autre part, les paramètres intrinsèques au pincement k_f , c_f ainsi que le coefficient de frottement traduisant la relation linéaire entre F_n et F_t , influent également dans la définition de la position et de la vitesse de la corde à son lâcher. Les variations ainsi reportées des conditions initiales des oscillations libres de la corde induisent des différences pertinentes du point de vue de l'acoustique. Cela justifie finalement la *signature sonore* spécifique à chacun revendiquée par les musiciens, et ce en relation avec le contexte musical dans lequel ils évoluent (technique de jeu considérée, doigt utilisé, ...).

Chapitre 6

Harp plucking robotic finger¹

Abstract

This paper describes results about the development of a repeatable and configurable robotic finger designed to pluck harp strings. Eventually, this device will be a tool to study string instruments in playing conditions. We use a classical robot with two degrees of freedom enhanced with silicone fingertips. The validation method requires a comparison with real harpist performance. A specific experimental setup using a high-speed camera combined with an accelerometer was carried out. It provides finger and string trajectories during the whole plucking action and the soundboard vibrations during the string oscillations. A set of vibrational features are then extracted from these signals to compare robotic finger to harpist plucking actions. These descriptors have been analyzed on six fingertips of various shapes and hardnesses. Results allow to select the optimal shape and hardness among the silicone fingertips according to vibrational features.

1. D. Chadeaux, J.-L. Le Carrou, M.-A. Vitrani, S. Billout, and L. Quartier, “Harp plucking robotic finger”, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Accepté le 3 juillet 2012.

6.1 Introduction

First straightforward mechanical automatons, musician robots are now able to produce realistic sounds and can even be compared to real musicians. A detailed history and evolution of musician robots is given in [Sobh et al. 2003; Kapur 2005; Kajitani 1999; Petersen et al. 2010]. Two particularly striking examples are the Waseda Flutist Robot (WF-4RII) [Solis et al. 2006] and a violin playing robot [Shibuya et al. 2007]. Both are studied in comparison to real musician's performance. Dealing with acoustical signals, features extracted from time-frequency analyses indicate that produced sounds seem to be realistic. Musician robots can be valuable to study musical instruments. Indeed, their investigation in playing conditions requires a highly controllable and repeatable excitatory mechanism. Several apparatus were already designed to study wind instruments, as blowing machines. Their development began in 1941 [McGinnis and Gallagher 1941] and is still in progress to study reed instruments [Ferrand and Vergez 2008], air-jet instruments [Ferrand et al. 2010] and brass instruments [Gilbert et al. 1998]. Regarding string instruments, the first artificial bow was designed in 1957 [Saunders 1937] to investigate violin family instruments. Mechanical systems have been developed for plucked string instruments. These devices are based on a wire placed around a string and pulled until it breaks. Note that the wire can be automatically [Smit et al. 2010] or manually pulled [Woodhouse 2004b]. However, these systems are far from reproducing real plucking, especially for the harp. Considering the classical playing technique, the fingertip slips on the string and imposes initial conditions which are a complex mix of displacement, velocity and rotation [Chadefaux et al. 2012c]. Unlike a wire, a robotic finger could provide these particular initial conditions. The present paper describes results from the development of a robotic finger designed to pluck the harp strings. As this robot is designed to reproduce the harpist plucking, an evaluation by comparison with harpist's performances is required.

Our paper is organized as follows. First, we describe the harp plucking and the artificial finger we designed. Then, an experiment is set up to measure the artificial finger displacement during the plucking and the soundboard vibrations. Hence, a comparison between the artificial finger and harpist plucking action is obtained. Finally, we evaluate the reliability of the designed system for reproducing harpists' plucking gestures.

6.2 Plucking description

In a previous study [Chadefaux et al. 2012c], a well-controlled experimental setup had been designed to study the harp plucking action. Measurements were performed with ten harpists in several musical contexts. About 150 plucking actions of the 30th string (Db2 at a fundamental frequency of 138.6Hz) have been analyzed. They were extracted from chord and arpeggio sequences, performed with the annular and the forefinger. The investigation of this database had shown that the motion is performed in the plane perpendicular to the direction of the strings and that it can be decomposed into three sequences [Chadefaux et al. 2012c; Le Carrou et al. 2007b]. First, the sticking phase (from about 100ms to 400ms), when the finger and the string move parallel to each other at the contact point, $\forall t \in [t_c; t_s[$. Then, the slipping phase (about

TABLE 6.1 – Robotic finger specifications.

Data	Maximum value
Force	15N
Area of use	$20 \times 20 \text{mm}^2$
Velocity of the fingertip	1.5m/s
Trajectories duration	200ms

3ms), when the string slips on the finger surface with opposite direction $\forall t \in [t_s; t_r]$. Finally, at a time denoted t_r , the string is released and its current characteristics (shape, velocity, ...) turn to be of prime importance on determining the produced sound. It defines, indeed, the initial conditions of the string free oscillations $\forall t > t_r$.

The study of these plucking actions shows different kind of trajectories, depending mostly on the performer and the technique she/he used. The movement of the harpist's finger can indeed be almost straight as well as really sinuous. Furthermore, a striking result is that the whole panel of plucking actions has been performed in a square with sides 20mm long. Regarding the finger behavior, 97% of the evaluated maximum velocities is less than 1.5m/s while 90% of them is less than 1m/s. The force applied by the finger on the 30th string is up to 15 N. Each harpist provides specific but highly reproducible initial conditions to the string vibrations. Its displacement, velocity and angular deviation have been measured at the release instant up to 8mm, 5m/s and 80° , respectively.

6.3 Robotic finger description

6.3.1 Description

As the robotic finger is designed to pluck harp strings, it has to be sturdy and at least as repeatable and accurate than a real harpist. Besides, it has to satisfy the specifications reported in Tab. 6.1. They are based on the plucking properties presented Sec. 6.2.

The designed robotic finger is presented in Fig. 6.1. Its base was conceived to be attached to the harp's column while preventing the robot to be prone to the harp vibrations. As the plucking action takes place in the plane perpendicular to the direction of the strings, the robot is chosen to be planar with two rotational joints. The conception of the yellow-arm in Fig. 6.1 works toward the achievement of the given force specification. Also, its geometry allows the length comparison of the last two human forefinger phalanxes, i.e. a length of 45mm.

As a matter of compactness, both motors are placed at the robot's base. A belt is used to transmit motor's torque to the second joint, as present in Fig. 6.2. The chosen belt has a length of 177.5mm, and a thread of 2.5mm. Since the diameter of the pulleys measures 17mm, the spacing is equal to $\frac{L-\pi D}{2} = 62.04\text{mm}$, ceiling to 62.1mm. As the harpist finger movement is enclosed in a square area of about 20mm side. The robotic finger setup allows the end-effector to follow any trajectory in a 400mm^2 . In order to perform the specific force and velocity within

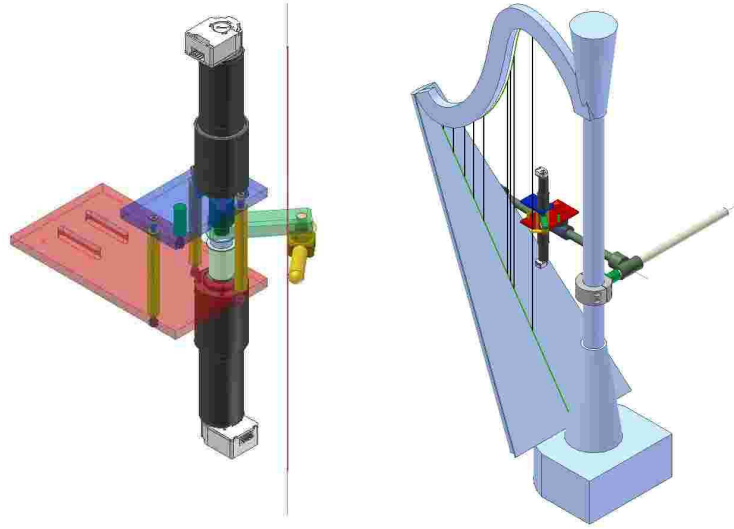


FIGURE 6.1 – Artificial finger on its frame (left) and rigidly fixed on the harp’s column (right).

this area, the actuation system is based on chain compound of Maxon RE35 motors, associated with Maxon GP 42C reducer and Maxon HEDL 5540 encoder.

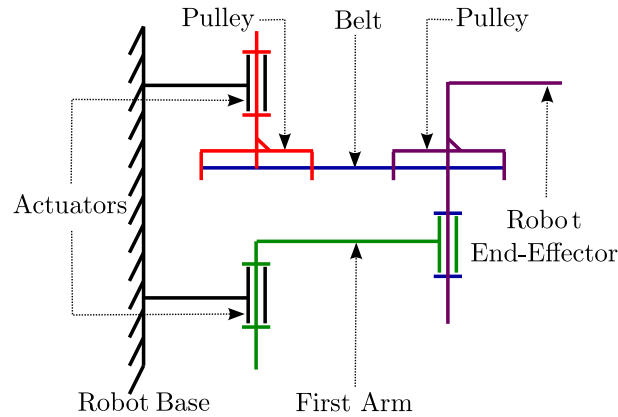


FIGURE 6.2 – Robot kinematics

This robot is position-controlled [Khalil and Dombre 2002], and the frequency of this control loop is 1kHz. Besides, a graphical user interface allows to define the trajectory the robot has to follow.

6.3.2 Fingertip shape and material

Fingertip shape and material are important aspects of the design. Both define the friction behavior between finger and string. The most suitable material for a robotic finger depends on various properties, such as friction/adhesion, mechanical properties, durability as well as suitability for tactile sensing [Cutkosky et al. 1987; Shao et al. 2009]. In touch experiments using a reference textile (normal loads vary between about 0.2N to 15N), the silicone’s and the

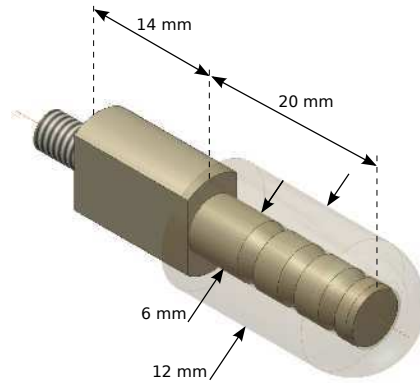


FIGURE 6.3 – Description of the Fingertip : bone in aluminum and fingertip in silicone.



FIGURE 6.4 – Silicone fingertips of three different shapes : B-C-A

human skin's friction coefficients are found to be close [Derler et al. 2007]. Thus, we chose silicone to mold the pulp of the real finger. As shown in Fig. 6.3, this piece of silicone is surrounding an aluminum bone. The fingertip's size is similar to a human one.

In order to point out the most appropriate parameters for the fingertip, a parametric study, analogous to [Han et al. 1996], is carried out. Three shapes and four materials, defined in Tab. 6.2 and shown in Fig. 6.4, were considered. Note that adding filler increases viscosity and hardness, while adding silicone oil dilutes it and decreases those characteristics.

6.4 Experimental procedure

6.4.1 Experimental setup

In order to evaluate the artificial finger performances in comparison with harpist, a measurement protocol is carried out (Fig. 6.5-a)). It is based on filming simultaneously the finger's distal phalanx and the string interaction with a high-speed camera while measuring the soundboard vibrations with an accelerometer glued to the bottom of the studied string. The estimation of the finger and the string trajectories is done in the plane perpendicular to the strings' direction by tracking markers positioned at strategic places in the direct view and in a mirror view, as presented in Fig. 6.5-b). Concerning harpist's finger, the marker is positioned close to the nail, which is assumed to be rigid and have the same movement as the distal phalanx. The robotic finger's marker is placed at the silicone fingertip's extremity since it is assumed to have the same behavior as the robot end-effector. Regarding the string, marker is glued as close as possible to

TABLE 6.2 – Silicone fingertips characteristics.

Notation	Shape	Material
A5	A : Cylindrical; round-extremity	Silicone + 5% of filler
A15	A : Cylindrical; round-extremity	Silicone + 15% of filler
A15O	A : Cylindrical; round-extremity	Silicone + 15% of silicone oil
A5L	A : Cylindrical; round-extremity	Silicone + 5% of filler + latex skin layer
B5	B : Cylindrical; float-extremity	Silicone + 5% of filler
C5	C : Plane-parallel	Silicone + 5% of filler

the plucking position. Markers positions presented in Fig. 6.5-b) were detected automatically through image processing. For each marker, the area of interest containing its image through the high-speed camera is selected by the user, creating the initialization template. Its contour is detected through active-contour modeling [Chan and Vese 2001], allowing the estimation of its center's position. A new template, corresponding to the initial one is then searched in the next image through a block-matching algorithm model [El-Azim 2002]. This process is recursively done within the entire set of images for all markers. We note $\tilde{x}$ and $\tilde{z}$ the horizontal marker displacements (in pixel) in the direct and mirror view, respectively. Their real displacements (in meter) are

$$x(t) = \tilde{x}(t) K_x^{px2m} \cos \theta_1, \quad (6.1)$$

$$z(t) = \frac{\tilde{z}(t) K_z^{px2m} + \tilde{x}(t) \cos \theta_1 K_x^{px2m} \cos 2\theta_2}{\sin 2\theta_2}, \quad (6.2)$$

with K_x^{px2m} and K_z^{px2m} the pixel to meter ratio, θ_1 the deviation between the image plane of the camera and the string's plane, and θ_2 the angle between the mirror and the string's plane².

6.4.2 Measurement protocol

For robotic finger evaluation purpose, a harpist has been asked to pluck eight times the 30th string (D $\flat$ 2 at 138.6Hz) with the right forefinger. Note that all strings but the plucked one were damped. Fig. 6.6 presents the performed finger movements over these plucking actions. The averaged finger's velocity at the release instant is estimated at 0.98 ± 0.08 m/s. This result conveys that these eight plucking actions are relevant relatively to the typical velocity measured on harpists in musical context. Hence, one over these movements has been selected (the grayed one in Fig. 6.6, for which we estimate a velocity of 0.99 m/s) to be injected as reference to the

2. L'annexe C expose le processus employé afin d'estimer les trajectoires ainsi que les incertitudes associées.

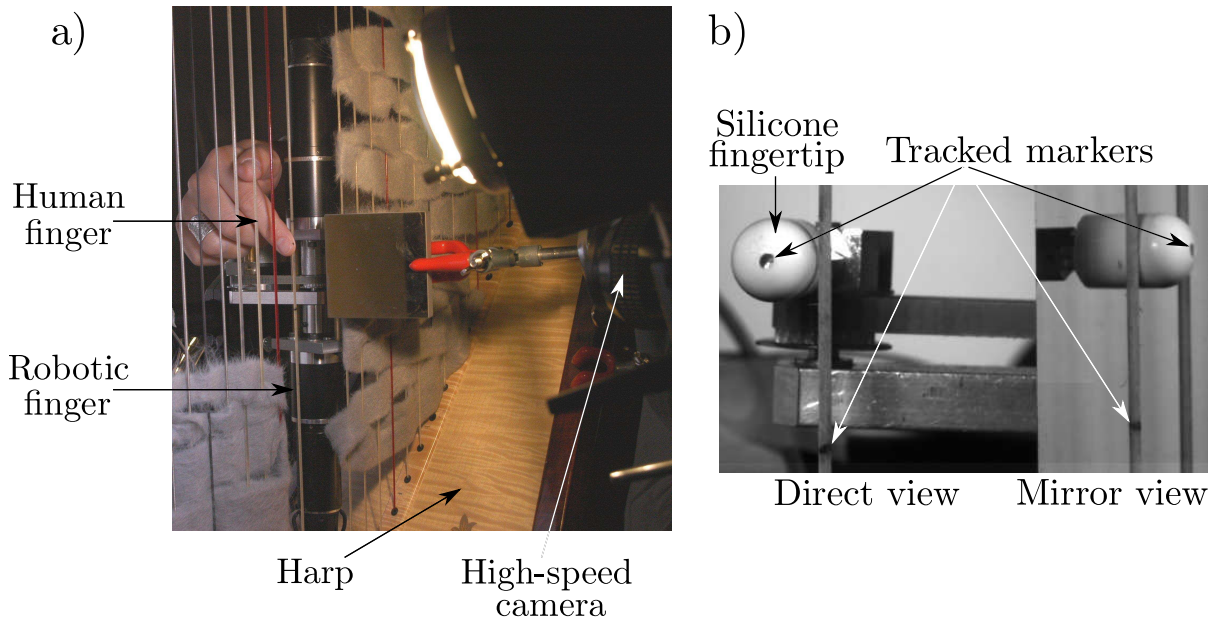


FIGURE 6.5 – a) Picture of the experimental setup with a human finger and the artificial one. b) Images obtained through the high-speed camera for a robotic plucking action in both the direct and the mirror views.



FIGURE 6.6 – Harpist forefinger movement during plucking actions. The grayed movement is used as reference for the robot.

robotic finger. It reproduces the movement with six different silicone fingertips, characteristics of which are presented in Tab. 6.2.

6.5 Results

In the following, the robotic finger is evaluated at different steps of the plucking action. First, the repeatability of the robot end-effector is analyzed. Then, the finger's distal phalanx trajectories are compared with the expected ones. Finally, the resulting soundboard vibrations are investigated.

6.5.1 Robotic finger repeatability

Although it is obvious that a servocontrolled DC-motor driven robot is more repeatable than human finger in no-load conditions, the dynamic time warping algorithm [Sakoe and Chiba

1978] confirms the robotic finger is about 82 times more repeatable than the harpist. Thus, the repeatability condition is clearly fulfilled.

6.5.2 Plucking action reliability

In order to evaluate the relevance of each silicone fingertip, the measured phalanx trajectories are compared to the robot end-effector and to the reference ones in Fig. 6.7. The reference trajectory is well-reproduced by the robotic finger. However, a slight deviation appears at the end of the sticking phase and reaches its maximum value at the beginning of the slipping phase t_s . According to [Chadefaux et al. 2012c], it indicates that the higher the finger/string force applied, the more the deviation from the reference because of the local deformation of silicone (Fig. 6.7). For instance, the fingertip A15O which has the lowest hardness shows the most important difference with harpist finger trajectory at the end of the sticking phase.

Regarding the reference, the sticking and the slipping phases defined Sec. 6.2 last 326.6ms and 2.8ms, respectively. Tab. 6.3-a) reports those durations for each silicone fingertip, denoting $\Delta\Phi_c$ and $\Delta\Phi_s$ the sticking and the slipping phases duration, respectively. Sticking phase lasts about 25% longer than expected without outstanding differences between fingertips. On the other hand, the slipping duration errors are ranged from 7% to 186%. These significant differences are most likely explained by the various fingertip mechanical properties (friction coefficient, hardness, ...). As a consequence, the displacement and the velocity of the string at the release instant will be changed, implying various spectral contents.

The maximal force applied by the finger to the string denoted F_{max} in Tab. 6.3-a) is computed according to the classical plucked string theory [Fletcher and Rossing 1998]. The estimation of F_{max} for the six fingertips is relevant in relation to the value measured on the harpist plucking (about 8.0N) with a maximal average error of 15%, where the reported uncertainty represents a 95% confidence interval. The maximal force, directly induced by the friction coefficient, is related to the dynamics of the produced vibrations. The waveforms of each plucking action presented in Fig. 6.8 illustrate this remark. For instance, A15O and A5L fingertips convey to the lowest measured maximal forces (5.6N and 6.6N, respectively) and obviously the lowest vibrational magnitude in Fig. 6.8.

6.5.3 Initial conditions of the string vibrations

The conditions of the string at the release instant define its free oscillations [Fletcher and Rossing 1998], i.e. the soundboard vibrations and the characteristics of the produced sound. Thus, descriptors of the initial conditions of the vibration phase are considered. They are reported in Tab. 6.3-b). The initial displacement of the string at the release instant denoted D is 6.5mm and ranged from 1.0mm to 5.7mm for the reference and the silicone fingertips, respectively. As previously mentioned, this descriptor is related to the slipping duration : during a longer slipping phase, the string will have time to return closer towards its rest position. The initial velocity of the string at the release instant is denoted V in Tab. 6.3-b). As for D , the order of magnitude of V is relevant for the robotic finger with A-shaped fingertip and middle or

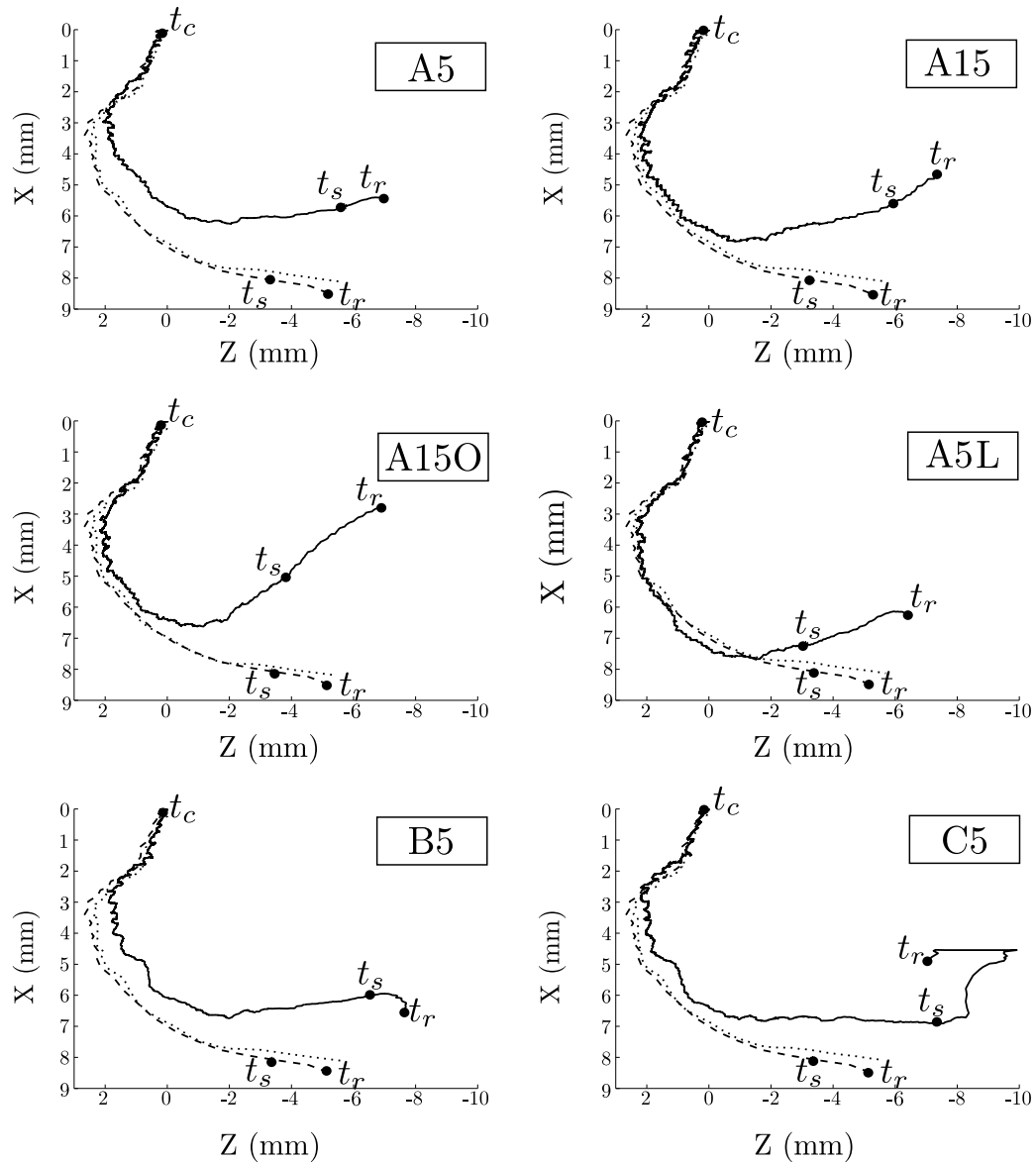


FIGURE 6.7 – Comparison of each silicone fingertips trajectory with robotic finger and reference trajectories. Plain line : Silicone fingertip. Dotted line : Robotic finger. Dashed line : Harpist finger trajectory which is defined as reference. t_c , t_s and t_r represent the beginning of the sticking, slipping and vibration phases, respectively.

high hardness. Inconsistency in this descriptor are due to an irrelevant friction coefficient. The more deviated maximal force and slipping duration values are estimated for A15O, A5L and C5 silicone fingertips, which also provide the more erroneous velocity values.

6.5.4 Soundboard vibrations

Besides the variations in the silicone fingertip's waveforms magnitude, we observe in Fig. 6.8 differences of shapes between signals. They seem to be related to the fingertip's geometry. Waveforms obtained within A-shaped fingertips show a similar *wave* pattern just after the maximal magnitude is reached, while the one conveyed by B and C-shaped fingertips have their own particular shapes. Considering vibrations magnitude, the C5 fingertip is the best of the six used. However, regarding the waveform, A15 and A5 fingertips are the closest to the harpist reference.

In order to highlight the best properties providing to a silicone fingertip, we extract and compare characteristic features of these signals [Peeters et al. 2011]. Denoting X the discrete spectrum, of length N , of the soundboard vibrations and f the frequency index function, they are presented in Tab. 6.3-c), and defined as follow :

- P_i measures the amplitude of the i -th peak of the spectrum, in decibel ;
- the spectral centroid measures the barycenter of the spectrum :

$$\mu = \left(\sum_{k=1}^N f(k) |X(k)| \right) / \left(\sum_{k=1}^N |X(k)| \right), \text{ in Hertz,}$$
- the central moments of order $i=2$, $i=3$ and $i=4$, defining the spread, the skewness (SK) and the kurtosis (K) of the spectrum are calculated based on the formula

$$\mu_i = \left(\sum_{k=1}^N (f(k) - \mu)^i |X(k)| \right) / \left(\sum_{k=1}^N |X(k)| \right).$$
 SK and K measure its energetic distribution's asymmetry and flatness around its centroid, respectively.

According to results presented in Tab. 6.3-c), notes produced by the 6 silicone fingertips are relevant compared to the reference. The error, averaged on all vibrations descriptors, is ranged from 9.9% to 41.8%. The amplitude and ratio of the spectral peaks are globally well-reproduced while spectral centroid and spectral spread imply error percentage up to 53%. Meaning that, excepted for the A5L finger, the acoustical level and the spectral balance are approximately well-reproduced, but not always as good for the spectral shape.

Moreover, spectrograms of each plucking action have been computed and presented in Fig. 6.8. Unlike harpist, signals performed by the robotic finger do not contain the 3rd and the 6th harmonics. This difference is due to the plucking position. As the robot was set to pluck exactly the string at the third of its length, the harpist's finger position on the string was prone to slight variations. Furthermore, the transient part, which is essential at a sound perception level, is clearly different from one spectrogram to another. Transient obtained with A5, A15 and C5 fingertips are the closest to the one produced by the real harpist. Again, this phenomenon is the consequence of the various silicone friction coefficients. Finally, as expected, signals resulting from sharp fingertips (B and C shapes) own more energy in high-frequencies than those resulting from smooth fingertips (A-shape) which are closer to the reference spectral energy distribution. Then, adding a glove on the silicone fingertip implies a 30-times reduction of the energy in

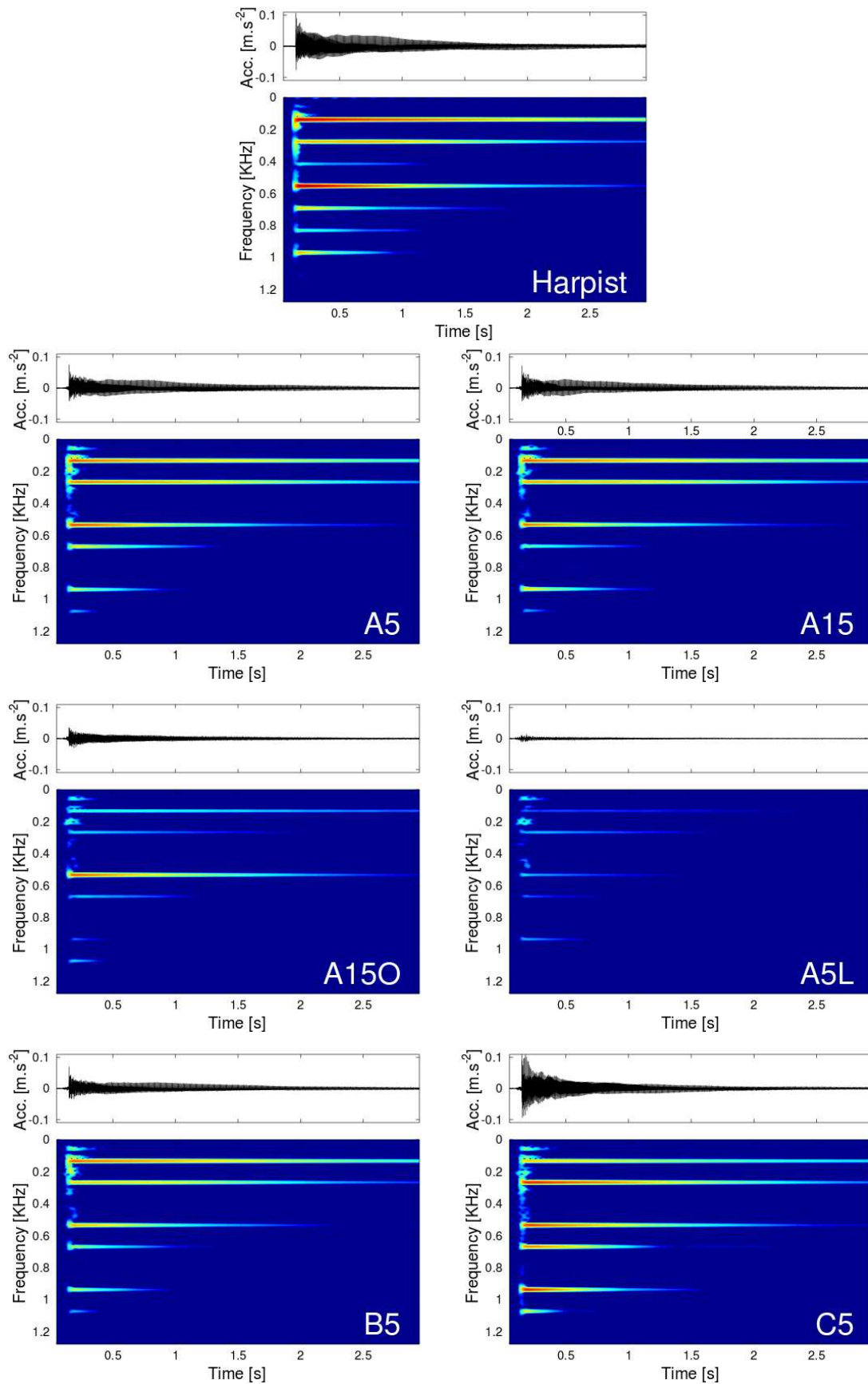


FIGURE 6.8 – Waveforms and spectrograms of accelerometer's signals measured on the sound-board at the bottom of the 30th string (D $\flat$ 2 at 138.6Hz) which is plucked by the harpist and by the robotic finger with each silicone fingertip. Spectrograms are shown in dB using a 70dB dynamic.

TABLE 6.3 – Classification of the silicone fingertips according to characteristic descriptors of the plucking action. The grayed-colored boxes correspond to the global better fingertips. The bold values correspond to the closest silicone fingertip to the reference for the considered descriptor.

<i>a) Plucking action characteristics</i>							
Descriptor	Reference	A5	A15	A15O	A5L	B5	C5
$\Delta\Phi_c$ (ms)	326.6	409.4	408.7	403.5	402.2	409.2	409.2
$\Delta\Phi_s$ (ms)	2.8	2.4	2.6	5.7	8.0	3.8	4.3
F_{max} (N)	8.0	7.1	7.1	5.6	6.6	7.6	9.8
<i>b) Release instant characteristics</i>							
Descriptor	Reference	A5	A15	A15O	A5L	B5	C5
D (mm)	6.5	5.7	5.1	3.3	2.2	4.7	1.0
V (m/s)	1.2	1.19	1.19	0.68	0.92	2.3	0.58
<i>c) Spectral soundboard vibrations descriptors</i>							
Descriptor	Reference	A5	A15	A15O	A5L	B5	C5
P_1 (dB)	68	64	63	51	44	64	60
P_1/P_2 (dB)	1.1	1.0	1.0	1.1	0.94	1.1	0.92
P_2/P_4 (dB)	0.91	1.0	0.98	0.77	1.0	1.0	1.0
μ (Hz)	722	673	900	1017	745	831	1106
σ^2 (kHz)	534	527	1117	1081	817	975	1008
SK (-)	2.4	2.6	2.0	1.8	2.5	2.1	1.6
K (-)	10.5	11.9	6.7	6.0	10.0	7.6	5.5
<i>d) Fingertip classification</i>							
Silicone fingertip		A5	A15	B5	A5L	C5	A15O
Average error compared to the reference		9.9%	23.1%	28.2 %	36.7%	41.5%	41.8%

the signal. Furthermore, considering a same shape, the softer the silicone, the lower the sound radiated energy.

Eventually, according to descriptors presented in Tab. 6.3 combined with spectrograms, the isolated notes produced by a part of the set of silicone fingertips is suitable for a harp sound. The silicone fingertip which matches best with the harpist performance is A-shaped and made of silicone with 5% of filler, with an average error percentage of 9.9% regarding to the reference in this study.

6.6 Conclusion

This paper has presented the development of a repeatable and configurable artificial finger able to pluck a string, especially using a classical harp playing technique. The chosen robot is planar with two rotational joints. It is enhanced by a silicone fingertip. To this end, six silicone fingertips differing on shape and hardness have been molded. The evaluation of the robotic finger is carried out by comparison of its performances with those of a harpist. Using a well-controlled measurement protocol, both plucking action and soundboard vibrations are compared by analyzing plucking action and vibrational features. The robotic finger mostly fulfills repeatability and accuracy objectives relative to the harpist. Concerning the silicone fingertip, one particular shape appears to be relevant over the three tested : cylindrical with round-fingertip. Besides, the silicone's hardness is of great importance since the deformation of the fingertip has an influence on the finger/string friction and the initial conditions of the string free oscillations. According to descriptors of the soundboard vibrations, a middle or high silicone hardness is relevant.

Further works will be carried out to investigate more mechanisms than position control, as for instance force and haptic feedback which are obviously occurring in the harp performance achievement. For this purpose, the fingertip instrumentation is planed. This will be valuable to provide informations about the plucking process to the robotic finger controller.

It will also be interesting to mold fingertips with other materials in order to achieve a thorough study of the finger/string friction characteristic.

Finally this is the first step to a repeatable and configurable excitation system to study string instruments behavior in playing conditions and to point out the influence of musical gesture parameters on the radiated sound.

Chapitre 7

Harp plucking modeling¹

Abstract

In this paper a model of the harp plucking is developed. It is split in two successive time phases : the sticking and the slipping phases, and uses a mechanical description of the human finger's behavior. The parameters of the model are identified through measurements of the finger/string displacements during the interaction. The validity of the model is checked using a configurable and repeatable robotic finger, enhanced with a silicone layer. A parametric study allows to investigate the influence of the model's parameters on the free oscillations of the string. As a result, a direct implementation of the model produces an accurate simulation of a string response to a given finger motion, as compared to experimental data. The set of parameters that govern the plucking action is divided into two groups : parameters controlled by the harpist and parameters intrinsic to the plucking. The former group and to a lesser extent the latter highly influence the initial conditions of the string vibrations. The simulations of the string's free oscillations highlights the large impact the model parameters have on the sound produced, and therefore allows the understanding on how different players on the same instrument can produce a specific, personal sound quality.

1. D. Chadeaux, J.-L. Le Carrou, and B. Fabre, "Harp plucking modeling", *J. Acoust. Soc. Am*, Soumis le 26 Juillet 2012.

7.1 Introduction

The question of the different qualities of the sound played by different harpists is a subject of discussion amongst players and acousticians. While everybody agrees that a player can easily be recognized by his/her style and technique, skilled players insist on the possibility to identify each other from the sound only, at the individual note level. Obviously, playing at the same plucking position on the string and producing the same global sound power, players can control some other aspects of the sound quality. Earlier results obtained on 10 skilled harpists indicate that each of them provide to the string a highly repeatable plucking path depending on the playing technique and the finger studied. Besides, it has been shown that the plucking position is almost the same for each harpist. It can therefore not explain the plucking specificity of the harpists. They finely control the initial shape, velocity, angle of polarization and rotation they provide to the string before releasing it, resulting in an accurate control of its free oscillations and of the sound produced. However, the way the player controls the harp plucking is not yet understood on a physical basis. A better understanding of the mechanical parameters that govern the plucking would allow to control sound synthesis of plucked string instruments in a realistic way. Indeed, although the numerous investigations of the physics of musical instruments allow the production of satisfying sound synthesis [Derveaux et al. 2003; Penttinen et al. 2006], there is a lack of realism in the control of their initial conditions, i.e. the state in which the musician sets the instrument to produce a sound. In the literature, this is mostly achieved by tuning parameters until to reach a satisfactory sound result.

Most of the studies about the plucking action and its synthesis deal with the classical guitar [Bradley et al. 1995; Karjalainen et al. 1998; Woodhouse 2004a; Cuzzucoli and Lombardo 1999; Evangelista 2010; Pavlidou 1997]. The plucking action is described as “ideal” [Bradley et al. 1995; Karjalainen et al. 1998; Woodhouse 2004a], i.e. the string vibrations are initialized only through a displacement, with no velocity [Fletcher and Rossing 1998]. Furthermore, the musician’s touch is reduced to that of a plectrum, corresponding to a triangular initial shape of the string. However, the presence of the musician and his control on the note produced has been investigated for the classical guitar [Pavlidou 1997; Cuzzucoli and Lombardo 1999; Evangelista 2010]. In these studies, physical modeling of the finger/string interaction has been proposed, with parameters adjusted to produce the desired sound, rather than physically relevant considerations. Experimentally-based investigations of the concert harp plucking [Le Carrou et al. 2007b 2008] has provided finger-string motion in order to estimate the mechanical parameters of the finger [Le Carrou et al. 2007b 2008]. However, the experimental constraints do not allow to point them out in a robust manner. Therefore, the estimation of relevant mechanical parameters to describe the plucking action remains a tricky issue. Besides, a study of the piano action mechanism [Izadbakhsh 2006] indicates that the viscoelastic behavior of the finger should be taken into account. Looking at the literature, a cautious investigation of the human finger behavior in plucking musical instruments has not yet been undertaken.

The present paper aims at modeling the classical concert harp plucking action. The model we propose is based on parameters estimated using measured displacements of the finger and of

the string. The latter are expected to describe both the mechanical parameters specific to the harpist's finger morphology and the one he/she has the possibility to control during plucking. Their impact on the sound produced is also investigated in order to point out the set of parameters revealing the specific sound of a musician. A modeling of the finger/string interaction is provided in Sec. 7.2. Then, an experimental procedure is described in Sec. 7.3 in order to capture the finger's and the string's motion during the plucking action. On one hand these measurements help to highlight the mechanical parameters of the musician's finger and, on the other hand to validate their relevance to model the string's response under a given finger's action in Sec. 7.4. Sec. 7.5 investigates the impact of these control parameters on the initial conditions of the string's free oscillations through a parametric study. Eventually, the parameters' estimation is applied to plucking actions in real musical context measured previously[Chadefaux et al. 2012c] in Sec. 7.6.

7.2 Harp plucking action modeling

The harp plucking can be split into two successive time phases[Chadefaux et al. 2012c] : the sticking and the slipping phases. The harp plucking modeling is structured accordingly.

7.2.1 Sticking phase

Description

During the sticking phase, the finger pulls a segment of the string from its initial position up to the point where the tangential shear force exerted by the string on the skin reaches a threshold force F_{max} , controlled by the harpist. Assuming that the displacement of the finger's distal phalanx and the string displacement only take place in the plane, fixed to the harp, perpendicular to the strings[Chadefaux et al. 2012c], we only investigate their trajectories in this plane referred as to $(x0z)$ in this paper. Their components are referred as to (x_s, z_s) and (x_f, z_f) in Fig. 7.1, respectively. As we only deal with isolated plucking actions, the string is considered to start from its rest position at t_c , i.e. $x_s(t = t_c) = x_0 = 0$, $z_s(t = t_c) = z_0 = 0$, at the beginning of the sticking phase. The mechanical behavior of the finger has to be taken into account to describe the sticking phase since the finger is squeezed while pulling the string. This deformation depends on both, the string's and the finger's mechanical properties.

Skin's mechanical properties

Many studies have investigated the mechanical properties of human finger[Gulati and Srinivasan 1997; Serina et al. 1997; Pawluk and Howe 1999; Nakazawa et al. 2000]. Whereas it is structured in three layers (the epidermis, the dermis and the hypodermis) with various mechanical properties, it has been shown that the finger's response to an external load can be seen like a mono-layer material with viscoelastic properties. Considering human tissue, Zener and Kelvin-Voigt viscoelastic models[Mainardi and Spada 2011] are commonly used [Boyer et al. 2007; Wang and Hayward 2007]. Furthermore, the finger's response to any load depends on the

dynamic properties of the *stimuli*, as its force, velocity, magnitude, frequency, as well as the angle between the finger and the contact surface [Han]. Eventually, viscoelastic models with non-linear components depending on the finger indentation are often used [Pawluk and Howe 1999; Serina et al. 1997; Marhefka and Orin 1999; Tie; Jindrich et al. 2003].

Modeling

Fig. 7.1 illustrates the interaction between the finger and the string during the sticking phase with its equivalent model. We model the sticking phase of the plucking action using a Kelvin-Voigt model. It consists in a spring and a dash-pot connected in parallel, reflecting the elastic and the viscous properties of the material. The spring's stiffness and equilibrium length are denoted k_f and l_f , respectively, while the damping of the dash-pot is referred as to c_f . The equilibrium length l_f represents the thickness of the finger at rest. On average, it is estimated at 1cm for the forefinger. Besides, as this phase is quasi-static, we model the string as a single spring of stiffness k_s . Indeed, assuming that we have a flexible string of uniform linear density ρ_l , stretched to a tension T and fixed at its ends, its free oscillations velocity can be easily computed[Morse 1948]. For instance, regarding the 30th harp string plucked at the third of its length, and released with an initial displacement of $D_{t_r} = 5\text{mm}$ from its rest position and an initial velocity of $V_{t_r} = 2\text{m/s}$, the maximal string velocity during the following oscillations is estimated at about 3m/s. Since the string velocity during the sticking phase does not exceed 0.5m/s, the latter is then assumed to be quasi-static. k_s is estimated based on the string's tension T , its length L , the plucking position y_0 and the width of the excitation Δl as

$$k_s = T \left(\left(y_0 - \frac{\Delta l}{2} \right)^{-1} + \left(L - y_0 - \frac{\Delta l}{2} \right)^{-1} \right). \quad (7.1)$$

Furthermore, the string equilibrium length l_s is chosen to be zero since the origin of the x - and z - axis is taken at the string's rest position.

The harpist's finger displacement in the (x_0z) plane is the input of the plucking action modeling. To model the response of the string (x_s, z_s) to this excitation, we define the frame of reference $(\vec{u}, \vec{v})$ related to the plucking action, where $\vec{u}$ and $\vec{v}$ are normal and tangential to the skin in the contact area, respectively. Fig. 7.1 illustrates this frame of reference at a given instant of the sticking phase. The distal phalanx displacement is defined as

$$u_f = l_f - \sqrt{(z_f - z_0)^2 + (x_f - x_0)^2} \quad (7.2)$$

along the latter axis and the plucking orientation α is estimated throughout the sticking phase as

$$\alpha = \arctan \left(\frac{z_f - z_0}{x_f - x_0} \right). \quad (7.3)$$

These parameters will convey the string's motion in the (x_0z) plane :

$$x_s = -u_s \cos \alpha \quad (7.4)$$

$$z_s = -u_s \sin \alpha. \quad (7.5)$$

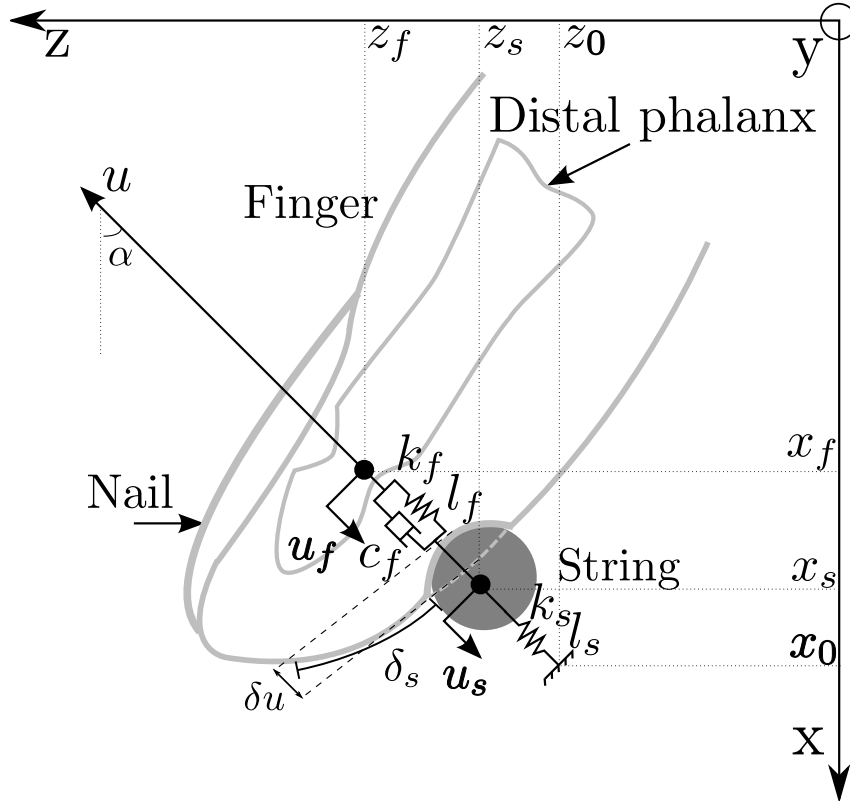


FIGURE 7.1 – Finger/string interaction during the sticking phase and its equivalent modeling.

Under quasi-static hypothesis, the force balance between the finger and the spring that models the string is written as :

$$\begin{aligned}
 & - k_s(u_s - l_s) + k_f(u_f - u_s - l_f) \\
 & + c_f \left(\frac{\partial u_f}{\partial t} - \frac{\partial u_s}{\partial t} \right) = 0.
 \end{aligned} \tag{7.6}$$

We define the finger's indentation parameter δu (see Fig.7.1), defined as

$$\delta u = l_f + u_s - u_f. \tag{7.7}$$

Eq. 7.6 then writes

$$k_s(u_s - l_s) + k_f \delta u + c_f \frac{\partial \delta u}{\partial t} = 0. \tag{7.8}$$

The parameters k_f and c_f correspond to the elastic and the viscous characteristics of the finger. They need first to be estimated in order to determine the string motion u_s from Eq. 7.6. Although, the relation between the load applied by a probe and the indentation has been shown to be exponential by some authors[Pawluk and Howe 1999; Serina et al. 1997], it appears that there is not clear agreement in the literature on the finger's stiffness and damping forms with respect to its indentation. Therefore, parameters k_f and c_f are both investigated under the

linear and exponential following forms :

$$\begin{aligned}
 k_f^{lin}(\delta u) &= k_f^a \delta u, \\
 k_f^{exp}(\delta u) &= k_f^a e^{k_f^b \delta u}, \\
 c_f^{lin}(\delta u) &= c_f^a \delta u, \\
 c_f^{exp}(\delta u) &= c_f^a e^{c_f^b \delta u}.
 \end{aligned} \tag{7.9}$$

The estimation of the parameters k_f^a, k_f^b, c_f^a and c_f^b will be carried through measurements of the finger and string motion while plucking a string. This will be presented in Sec. 7.4.

7.2.2 Slipping phase

Description

From the beginning of the slipping phase ($t = t_s$) until the release instant ($t = t_r$), the string slips on the finger's surface. The length δ_s of the slipping corresponds to the initial distance between the fingertip and the string, which is defined at t_c by the harpist. During the slipping phase, the string motion relative to the finger and the friction force have opposite directions $\vec{r}_f$ and $\vec{r}_s$, see Fig. 7.2.

Friction properties of the human finger

The friction force governing this phase is investigated in the present paragraph. Note that the string's element contacting the finger is cylindrical and can be in gut, in nylon or in steel as we focus on harp strings. In general terms, the friction of the human skin F_t is governed by [Tomlinson 2009]

$$F_t = F_a + F_d + F_v + F_r, \tag{7.10}$$

where

- F_a is the adhesive friction component related to the contacts of asperities between the finger and the contact surface,
- F_d is the friction related to the deformation of the finger,
- F_v is the friction due to capillary adhesion or viscous shearing, reflecting the self lubrication system of the finger,
- and F_r is the friction due to deformation of finger ridges.

Investigations of the forearm friction indicate that Eq. 7.10 can be reduced [Adams et al. 2007] to the terms F_a and F_d . However, it has been shown [Kwiatkowska et al. 2009; Tomlinson 2009] that the friction related to the deformation of the finger F_d can be neglected relatively to the adhesive friction F_a . Therefore, in order to model the string slipping over the finger surface during plucking, the friction force is assumed to be only described by the adhesive friction F_a . In the literature, it is written as a function the normal force F_n applied by the finger on the contact surface. Because of the viscoelastic properties of the human skin, the Coulomb model predicting a linear dependency of F_t in F_n through a friction coefficient μ has been questioned [Sivamani

et al. 2003; Koudine et al. 2000]. The non linear model

$$F_a = \mu F_n^\beta \quad (7.11)$$

has been proposed where β is a coefficient lower than 1. However, a recent investigation [Tomlinson 2009] of the friction between human fingers and contacting surfaces indicates that a two-linear relationship exist between F_t and F_n , with the junction point at $F_n^{lim} = 1\text{N}$:

$$\begin{cases} F_t = \mu_1 F_n, & \forall F_n \leq F_n^{lim}, \\ F_t = \mu_2 F_n, & \forall F_n > F_n^{lim}, \end{cases}$$

As the friction phenomenon in harp plucking occurs for normal forces always greater than 1N [Chadefaux et al. 2012c], we assume the relationship between F_t and F_n to be linear through a unique friction coefficient μ .

Modeling

Fig. 7.2 illustrates the plucking action during the slipping phase. The direction of the slipping is given by the angle

$$\gamma = \arctan\left(\frac{x_f}{z_f}\right). \quad (7.12)$$

Besides, as the string velocity can reach up to 2m/s during the slipping phase [Chadefaux et al. 2012ca], the quasi-static hypothesis we used during the sticking phase can not apply during slipping. Hence, the application of the Newton's second law to the string's element contacting the finger surface during the slipping phase writes as :

$$\rho_l \Delta l \frac{\partial^2 \vec{r}_s}{\partial t^2} = -k_s \vec{r}_s + \vec{F}_t \quad (7.13)$$

where ρ_l is the string mass per unit length, or linear mass density. According to the Sec. 7.2.2, the previous Eq. 7.13 can be written

$$\rho_l \Delta l \frac{\partial^2 \vec{r}_s}{\partial t^2} = -k_s \vec{r}_s + \mu \vec{F}_n, \quad (7.14)$$

The normal force F_n is [Valette 1995]

$$F_n = \sqrt{x_s^2 + z_s^2} \frac{LT}{(y_0(L - y_0))}. \quad (7.15)$$

It will finally convey the string's motion during slipping ($t_s < t < t_r$) in the $(x0z)$ plane :

$$\frac{\frac{\partial z_s}{\partial t}}{\frac{\partial x_s}{\partial t}} = \tan \gamma. \quad (7.16)$$

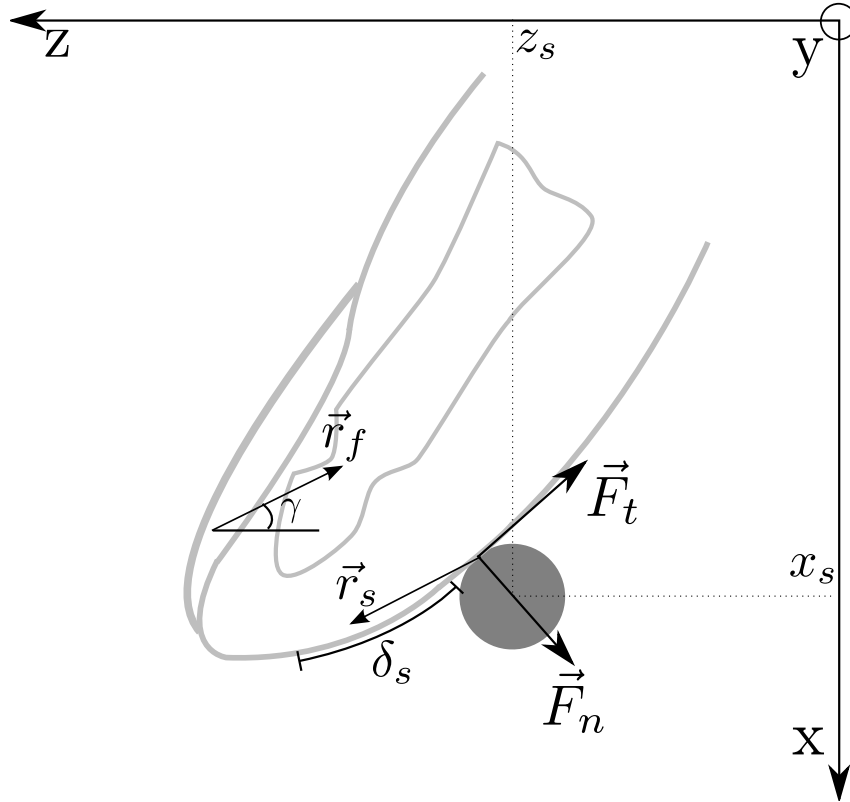


FIGURE 7.2 – Finger/string interaction during the slipping phase.

7.2.3 Summary

The sticking phase is mostly influenced by the finger's viscoelastic compression. Since the characteristic time of the sticking phase is long compared to the time period of the string oscillation, a quasi-static description can be used. Therefore, the contact force, *normal* to the skin in the contact area, can be deduced from the string displacement at the contact point. The slipping phase is triggered at the time when the *tangential* force exerted by the string on the finger reaches the maximum sticking force F_{max} , therefore when the string displacement in the tangential (skin surface) direction reaches F_{max}/k_s . The force F_{max} depends on the normal contact force applied to the skin surface, which is related to the string displacement in the normal direction. Once the slipping phase has begun, the friction force reduces the natural string acceleration. As a consequence, by adjusting the initial contact position of the string on the finger and finger path during the sticking phase, the player can adjust the position where the slipping phase starts, the duration of the slipping phase, the position of the string release, the string velocity at release, as well as the initial polarization of the free string oscillation. Fig. 7.3 proposes a block diagram of harp plucking modeling, including the mechanical parameters involved.

- The harpist's control parameters are F_{max} , δ_s and the motion of the finger referred to as its components x_f and z_f ,
- The sticking and slipping parameters k_f^a , c_f^a , and c_f^b describe the contact between the finger and the string for a given plucking context (angle between the finger and the string, δ_s ,

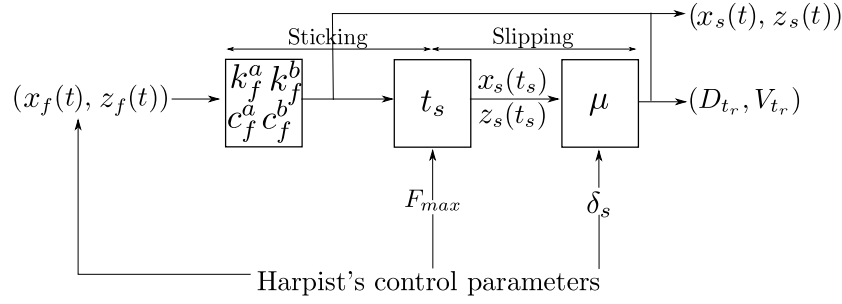


FIGURE 7.3 – Summurize of the harp plucking modeling

...).

This model allows to estimate the finger mechanical properties from measurements of finger and string displacements during plucking action. In the following step, the model can predict the string's response to a given finger's distal phalanx motion (x_f, z_f) . These two aspects will be discussed in Sec. 7.5.

7.3 Experimental procedure

The finger/string interaction model proposed in this paper is compared to real finger and string motion during plucking actions. Three configurations are investigated. First, finger and string motion have been measured for plucking actions performed by an artificial finger shown in Fig. 7.4-a). It is a repeatable and configurable tool to pluck a string as desired. In order to model the human plucking, it is enhanced by silicone fingertips. We use cylindrical fingertips with a rounded ending and two different hardnesses. Fingertips are referred to as F1 or F2 in the following, with F1 softer than F2. Besides, for variability issues, measurements have been performed three times with F2. The robot finger has been shown to reproduce accurately an input reference displacement, and to produce a sound close to that of a real harpist's [Chadefaux et al. 2012ba]. The use of this artificial finger is justified by its ability to provide a repeatable plucking with a planar motion, i.e. the closest to the model analysis. Then, in order to gradually investigate the robustness of the model, isolated plucking actions performed by a harpist are captured. She has been asked to pluck eight times the 30th string with the right forefinger as illustrated in Fig. 7.4-b). This second configuration represents an intermediate step between the robotic finger and harpists in a real musical context since her plucking technique is more realistic than the former (for instance with an additional rotation of the finger around the string) and does not contain the transitions' techniques between two succeeding notes. Eventually, finger and string motions have been measured for plucking actions performed by ten harpists in various musical contexts, as in arpeggio or chord sequences using the forefinger as well as the annular. The database used is the same as investigated in the previous study of the plucking action [Chadefaux et al. 2012c]. These measurements will help to point out the robustness of the model and to highlight tendencies in the whole set of mechanical parameters estimated, according to the musical context.

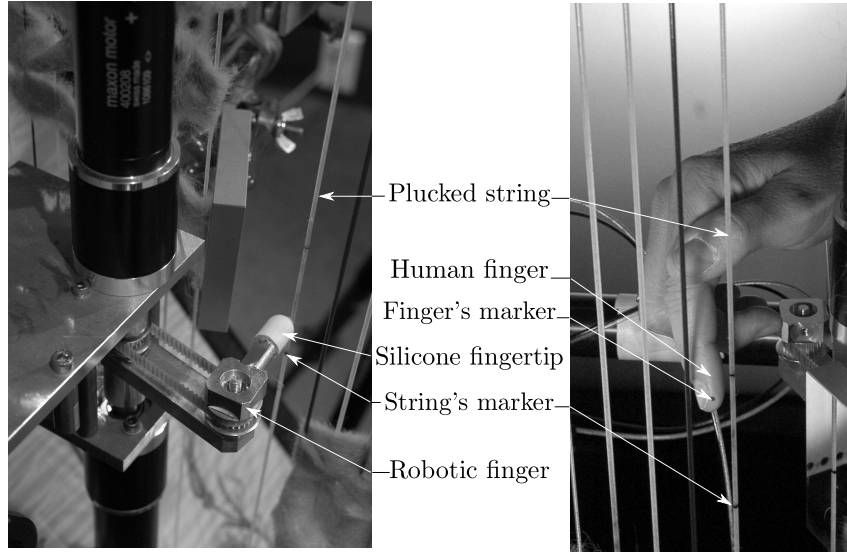


FIGURE 7.4 – Experimental setup using a) robotized and b) real plucking actions.

The measurement protocol carried out is mostly based on capturing the motion of the finger and of the string with a high-speed camera set at 10000 frames per second. As this experimental method has already been detailed in a previous paper[Chadefaux et al. 2012c], we summarize here the main steps. The estimation of the finger and the string trajectories is performed by tracking markers, placed on finger and string at strategic places, through image processing[Chadefaux et al. 2012c]. More precisely, since we are interested in displacements referred to as x_s , x_f , z_s and z_f in Fig. 7.1, markers are positioned as close as possible to the plucking position y_0 and to the nail, respectively. The latter is assumed to be rigid and to provide a good estimation of the distal phalanx displacement.

7.4 Plucking parameters estimation

7.4.1 Sticking parameters

Method

The sticking parameters referred as to k_f^a, k_f^b, c_f^a and c_f^b are estimated using an experimental database of plucking actions (x_s, z_s) and (x_f, z_f) . Using the latter combined with Eq. 7.2 and Eq. 7.5, Eq. 7.8 is solved with Runge-Kutta algorithm for a set of finger's stiffness and damping values. Then, a wide range of values are tested through the Levenberg-Marquardt algorithm[Levenberg 1944; Marquardt 1963]. This allows to determine the best set of parameters to solve the equation by minimization. For this purpose, the experimental trajectories are previously approximated by a sixth order polynomial curve fitting.

The robustness of the method to input noise is investigated in Fig. 7.5 in the case of isolated

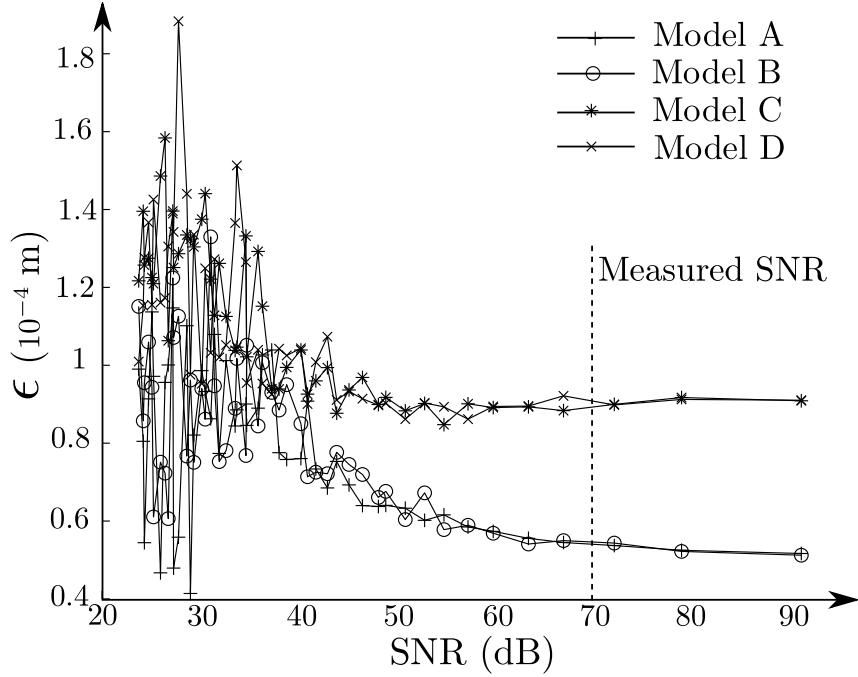


FIGURE 7.5 – Evolution of the reconstruction error of a reference curve versus its signal to noise ratio.

notes played by the robotic finger. The reconstruction quadratic error is estimated as

$$\epsilon = \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_{t=T_s}^{NT_s} |\tilde{u}_s(t) - u_s^{th}(t)|^2 \right)} \quad (7.17)$$

where T_s is the sampling period of the experimental data ($10\mu s$). $\tilde{u}_s$ is the reconstructed string's displacement for a given finger and string (u_s^{th}) displacements over a wide range of artificial input noise added to the experimental data. The error is estimated for the four models investigated :

- Model A : Exponential stiffness and damping (k_f^{exp}, c_f^{exp}),
- Model B : Linear stiffness and exponential damping (k_f^{lin}, c_f^{exp}),
- Model C : Exponential stiffness and linear damping (k_f^{exp}, c_f^{lin}),
- Model D : Linear stiffness and damping (k_f^{lin}, c_f^{lin}).

As expected, we observe that ϵ is higher for a low Signal to Noise Ratio (SNR). Moreover, this error tend to become stable from a SNR above 60dB. Since the typical SNR for our measurements is about 70dB, we assume the method to be reliable. Eventually, the comparison of the four models indicate that a linear damping induces a higher reconstruction error ($\epsilon \simeq 0.9 \times 10^{-4}m$) than an exponential one ($\epsilon \simeq 0.6 \times 10^{-4}m$). Therefore, models A and B appear to be the most relevant ones. Performances of A and B models for several different plucking situations show that the former is more accurate and then suitable than the latter².

2. Le détail de la comparaison de ces deux modèles est fourni à l'annexe E.

	k_f^a ($N.m^{-1}$)	c_f^a ($N.s.m^{-1}$)	c_f^b (m^{-1})	$\tilde{\epsilon}$ ($\times 10^{-6}\%$)
Robotic finger				
F1	311	675	87	2.0
F2	339	1031	90	1.0
F2	326	1093	69	1.0
F2	350	1061	78	1.0
Harpist				
P_1	1785	1480	84	20
P_2	1701	1754	72	22
P_3	1350	1867	89	8
P_4	294	659	6	6
P_5	1067	1134	78	3
P_6	714	475	139	5
P_7	788	516	51	12
P_8	1015	351	216	115

TABLE 7.1 – Stiffness (k_f^a) and damping (c_f^a , c_f^b) coefficients estimated with the model A and the percentage of reconstruction quadratic error $\tilde{\epsilon}$ according to the string's displacement for the whole set of robotic and human plucking actions.

Results

The database of the robotic plucking actions and the isolated notes performed by a harpist are used to determine the sticking parameters k_f^a , c_f^a and c_f^b for model A. The reconstruction error estimated in percent for each plucking action is reported in Tab. 7.1. It is computed with respect to the distance covered by the string during the plucking. First, we observe that the percentage error $\tilde{\epsilon}$ is always very small compared to the amplitude of the movement, and that the reconstructions are better for the robotic plucking actions than for the human ones. This result is not surprising since the artificial finger performs a planar motion, whereas the harpist provides additional rotation to the string.

Then, let us consider the robotic plucking actions in Tab. 7.1. Three repetitions of the same motion has been performed with the fingertip referred as to F2. The estimated parameters corresponding are close, which tend to validate the parameter estimation process. Indeed, the variabilities around the mean values are 3%, 3% and 13% for k_f^a , c_f^a and c_f^b , respectively. Eventually, the sticking parameters reflect the hardness character of the fingertip : the estimated values of k_f^a and c_f^a are greater for silicone fingertips with higher hardnesses. Thus, for a given finger indentation, the finger/string interaction force has to be higher regarding F2 than F1. Besides, c_f^b reflects the maximal finger indentation reachable for a given fingertip. These estimations confirm that a softer material as F1 owns a larger range of possible indentations than F2.

Eventually, the sticking parameters obtained for the 8 plucking actions performed by the

harpist are investigated. Although the harpist used the same finger, we observe an important variability in the parameters estimations (about 40% around the mean values). It can be explained through variations in the contact surface. Indeed, as the harpists was asked to performe isolated notes, she performed less repeatable plucking actions than in a realistic musical context. Then, some plucking actions were for instance performed close to the fingertip, while others used the finger's pulp. Obviously, the mechanical properties of the finger vary along the distal phalanx, the fingertip being harder than the pulp. The estimation of δ_s supports partly this assumption since it is measured to 0.2mm for $P_{1,2,3,6,7}$, to 0.04mm for $P_{4,5}$ and to 0.09mm for P_8 . Besides, the variability of the skin condition over the 8 plucking actions and of the contact angle may explain these variations in the parameters' estimations.

7.4.2 Slipping parameters

Method

The coefficient of friction μ is determined for the entire set of measured plucking action. For this purpose, the orientation of the slipping is first estimated through Eq. 7.12. Then, using measurements of the string displacements (x_s, z_s) , Eq. 7.14 is solved using a Runge-Kutta algorithm for a given value of the friction coefficient. The Levenberg-Marquardt algorithm applied to this resolution with a wide range of friction coefficient values provide the more suitable one through minimization. As for the sticking phase, the experimental trajectories are approximated by a sixth order polynomial curve fitting before this estimation process.

Results

The human and the robotic plucking action database is used to estimate their associated finger/string friction coefficients. The reconstruction error, computed following the Eq. 7.17 for each estimation of μ , presented in Tab. 7.2 appear to be very very small compared to the amplitude of motion. The slipping phase modeling presented in Sec 7.2.2 is therefore reliable. Furthermore, as expected, the variability observed within the 8 plucking actions performed by a harpist is higher than within different silicone fingertips. In both cases, μ is of the same order of magnitude for all the plucking actions. Hence, this result indicates that the silicone fingertip of the robot finger shows slipping properties close to that of a human finger.

However, the variability observed between the three estimations of μ for the three plucking actions repeated by F2 is not negligible : it seems difficult to estimate accurately the friction coefficient. Indeed, it highly depends on the experimental context as the skin condition (dry, wet, clean, ...)[Akay 2002], the angle between the finger and the contact surface, as well as the shape and the material of the contacting object [Derler and Gerhardt 2012]. Besides, the range of friction coefficients measured for the finger in various experimental configurations is very large, and no result about the friction of the finger with a spherical probe (the closer experimental context to ours) has been pinpointed in the tribology literature. Hence, based on a recent review of experimental results for the friction coefficient of human skin[Derler and Gerhardt 2012], Tab. 6 and Tab. 7 report results focusing on fingers sliding on various material

	μ	$\tilde{\epsilon} (\times 10^{-4}\%)$		μ	$\tilde{\epsilon} (\times 10^{-4}\%)$
	Robotic finger			Harpist	
F1	1.00	1.8	P_1	0.99	0.4
F2	0.96	1.0	P_2	0.99	1.5
F2	1.00	0.2	P_3	0.97	5.0
F2	0.90	0.0	P_4	0.91	0.2
			P_5	0.87	0.1
			P_6	0.99	1.0
			P_7	0.97	4.3
			P_8	0.98	1.3

TABLE 7.2 – Friction coefficients (μ) and percentage of reconstruction quadratic error $\tilde{\epsilon}$ according to the string's displacement estimated for the whole set of robotic and human plucking actions.

surfaces and on spherical probe sliding on forearms, respectively. They indicate that the normal force applied by the probe, its material as well as its geometry have a great influence on the friction coefficient. Thus, in the present case, the friction coefficient is estimated including all these influence parameters.

7.4.3 Reconstruction of isolated plucking

The parameters of the sticking and of the slipping phases estimated either for the harpist, or for the artificial finger are used to simulate plucking actions. Fig. 7.6-a) and Fig. 7.6-c) present two selected sets of finger and string displacements measured for the harpist and the artificial finger, respectively. Taking the finger's displacement as input reference of the simulation, the modeled string's response is also drawn in solid line. It is computed according to the process presented in Sec. 7.2.3. In both cases, the global shape of the string motion is consistent with the measurement. However, a deviation appears in the orientation of the modeled and measured string along the path for the harpist plucking action and, to a lesser extent, for the robotic plucking action in Fig. 7.6-a) and in Fig. 7.6-c). A close observation of the curves indicates that, for the harpist plucking action, the measured string does not follow the same orientation α as the finger during the plucking. This is most probably due to the rotation the finger applies to the string around its axis, inducing an erroneous estimation of α . As the robotic finger performs a perfectly planar motion, the estimation of the latter variable and the reconstruction of the string displacement are better. Moreover the slight deviation occurring Fig. 7.6-c) is probably due to the finger indentation, affecting the estimation of the orientation α . Therefore, the latter appears to be a key-variable to deduce accurately the string displacement (x_s, z_s) based on Eq. 7.5. Fig. 7.6-b) and Fig. 7.6-d) present the same results as in Fig. 7.6-a) and Fig. 7.6-c) but with an additional adjustment of the string orientation α during the sticking phase. The string's displacement reconstruction is obviously more accurate than previously. The motion investigated for the robotic finger shows a more sinusoidal shape than that of the harpist, which helps minimizing the error in the reconstruction at the end of the sticking phase.

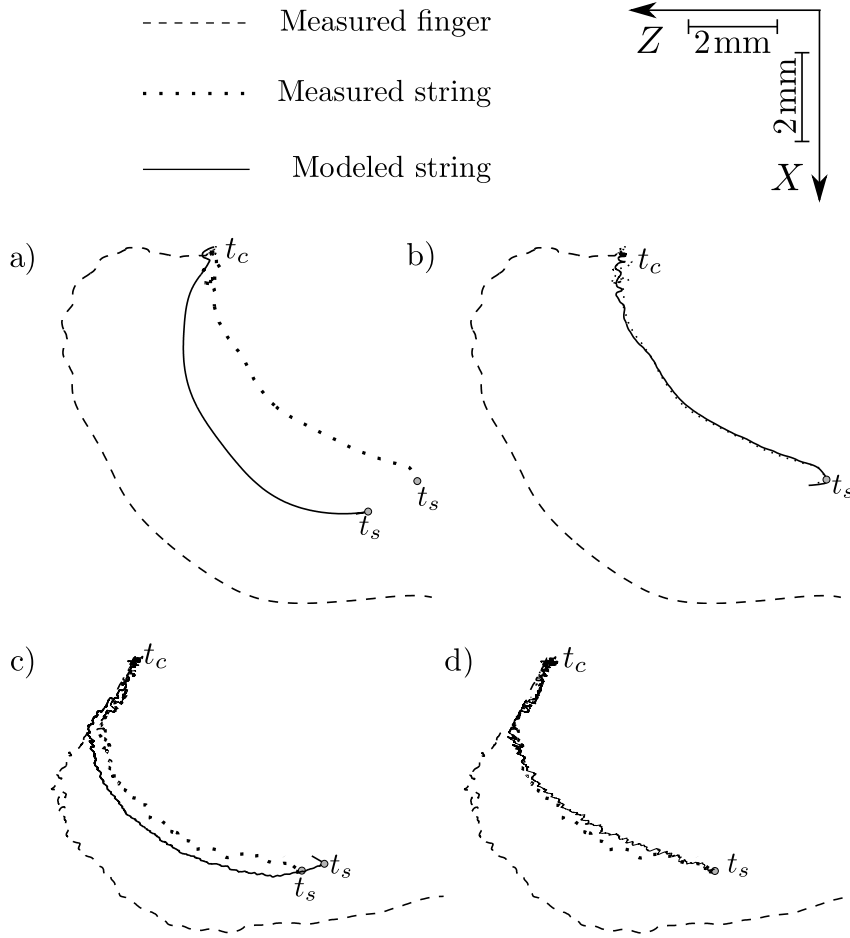


FIGURE 7.6 – Measured and simulated plucking action. a) Plucking action performed by a real harpist finger, b) with an additional adjustment of the string orientation, c) Plucking action performed by the artificial finger, and d) with an additional adjustment of the string orientation.

Eventually, due to the strong stability of the friction coefficient, the reconstruction of the slipping phase is more straightforward. Thus, the simulated displacement of the string match the measured one well for both harpist and robotic plucking actions.

7.5 Influence of plucking on string oscillations

7.5.1 Method

The influence of the plucking parameters on the string's oscillations are investigated in the present section. For this purpose, we input a finger's displacement (x_f, z_f) into the model and analyze the string's displacement (x_s, z_s) produced for a set of plucking characteristics $(k_f^a, c_f^a, c_f^b \text{ and } \mu)$, and control parameters $(\delta_s \text{ and } F_{max})$.

At the end of the sticking phase, the string's state can be described through its position $\vec{r}_{t_s}$ and its velocity $\vec{V}_{t_s}$. Since the string's trajectory will have a direction opposite to that of

the finger during the slipping phase, its velocity is close to zero in every possible case. Hence, the value of the string velocity at the end of the sticking phase is not expected to be a relevant parameter. However, as $\vec{r}_{t_s}$ is related to both, the string's displacement relative to its rest position D_{t_s} and the slipping orientation, it is assumed to be of great importance relatively to the initial displacement D_{t_r} , velocity V_{t_r} and angle of polarization γ at the beginning of the string's free oscillations. During the sticking phase, $\vec{r}_s$ is governed by the finger's mechanical parameters and by the threshold force for sticking the harpist applies to the string. Based on classical string's vibration theory, Eq. 7.15 provides the linear dependency between F_{max} and D_{t_s} . However, the relationship between the latter and k_f^a , c_f^a , c_f^b is not straightforward. It is investigated through the path followed by the string for a given finger's motion. Besides, according to the previous results, F_{max} , μ and δ_s may directly impact D_{t_r} and V_{t_r} .

A parametric study is carried out to point out the influence of this set of parameters on the initial conditions for oscillation D_{t_r} and V_{t_r} . Fixing the whole set of parameters but one to a reference value allows to investigate variations of D_{t_r} and V_{t_r} according to the reachable range of values of the unfixed parameters. Based on previous numerical or experimental estimations of the plucking parameters, the following ranges of the parameters are defined as :

- $k_f^a \in [10; 2000]\text{N.m}^{-1}$; $Ref = 326\text{N.m}^{-1}$,
- $c_f^a \in [500; 2000]\text{N.s.m}^{-1}$; $Ref = 1093\text{N.s.m}^{-1}$,
- $c_f^b \in [1; 100]\text{m}^{-1}$; $Ref = 69\text{m}^{-1}$.
- $F_{max} \in [1; 10]\text{N}$; $Ref = 5\text{N}$,
- $\mu \in [0.87; 1.0]$; $Ref = 0.99$,
- and $\delta_s \in [0.1; 2]\text{mm}$; $Ref = 1\text{mm}$.

Finally, we evaluate the influence of D_{t_r} and V_{t_r} on the string's vibrations through classical spectral descriptors. They are computed on the string free oscillations simulation. The descriptors we use are often calculated on the radiated sound rather than on the string vibration. Even if the relationship between the vibration of the string and the radiated sound is not straightforward (it actually takes into account the soundboard mobility and the radiating properties of the instrument), we expect relative values of the descriptors to give an insight on the influence of the plucking conditions. For this purpose, as in Sec. 7.2, the string is assumed to be flexible, of uniform linear density ρ_l , stretched to a tension T , fixed at its ends and plucked at one third of its length. Hence, the modal amplitudes A_n and B_n of the transverse vibrations are[Fletcher 1976; Morse 1948; Chaigne and Kergomard 2008]

$$A_n = \frac{2D_{t_r} \sin(k_n y_0)}{k_n^2 y_0 (L - y_0)}, \quad (7.18)$$

and

$$B_n = \frac{2V_{t_r} \sin(k_n y_0)}{k_n^3 y_0 (L - y_0)c}. \quad (7.19)$$

Eventually, the following set of descriptors is calculated for the different initial conditions of

string vibration. Denoting by $f_n = nf_0$ the eigenfrequencies and f_0 the fundamental frequency,

$$CGS = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} nf_0(A_n^2 + B_n^2)}{\sum_n (A_n^2 + B_n^2)}, \quad (7.20)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} (nf_0 - CGS)^2 (A_n^2 + B_n^2)}{\sum_n (A_n^2 + B_n^2)}, \quad (7.21)$$

where CGS is the spectral centroid, and σ^2 is the spread of the spectrum around CGS . The former, CGS is expected to show a good correlation with the sensation of brightness of the sound produced [Grey and Gordon 1978], while σ^2 describes the spectrum's shape.

7.5.2 Results

The path followed by the string during the sticking phase is first investigated. Fig. 7.7 presents 7 graphs. Each of them presents the finger and string motion in dashed and dotted lines, respectively. They correspond to the second measured plucking action performed by the artificial finger enhanced with F2. Fig. 7.7-a) presents in solid line the simulated string's response to the finger motion with the mechanical parameters estimated previously in this paper. It is considered as a reference in the following paragraph. Fig. 7.7-b) and Fig. 7.7-c) show the evolution of the simulated string's motion while k_f^a takes its minimum and maximum value, respectively. Similarly, Fig. 7.7-c) and Fig. 7.7-d) on one side and Fig. 7.7-e) and Fig. 7.7-f) on the other side report the impact of c_f^a and c_f^b on the plucking modeling. The entire set of finger's characteristic during the sticking phase appears to have a non negligible influence on the string's motion. For instance for the lowest value of k_f^a , the string goes in the finger easily until reaching the bone. Thus, the finger and the string follow almost the same trajectories during plucking in Fig. 7.7-b). Besides of the plucking's shape, the position of the string at the beginning of the slipping phase is clearly related to the mechanical parameters k_f^a , c_f^a and c_f^b , while the string's displacement D_{t_s} is mostly governed by F_{max} .

Tab. 7.3 reports the influence of F_{max} , δ_s and μ on the initial conditions of the string vibrations D_{t_r} and V_{t_r} . The former is prone to important variations (from 0.03 to 7.4mm) according to the maximal force applied by the finger on the string. It represents a variability of 211% relatively to its reference value (3.5mm). To a lesser extent, initial conditions of the string oscillations are also impacted by the slipping distance δ_s with 43% of variation. As expected, the coefficient of friction does not influence the distance of the string relatively to its rest position at the release instant. As for V_{t_r} , the three slipping parameters have almost the same impact. They imply a variability of 93%, 133% and 80% around its reference value (1.5m.s^{-1}). Besides, the behavior of V_{t_r} according to their variations is coherent. Indeed, both a higher slipping distance and a higher friction coefficient imply a longer slipping phase and a higher velocity at the release instant.

The influence of the initial conditions of the string's oscillations D_{t_r} and V_{t_r} on the spectral descriptors are presented in Tab. 7.4. The reference values used are 3.5mm and 1.5m/s for D_{t_r} and

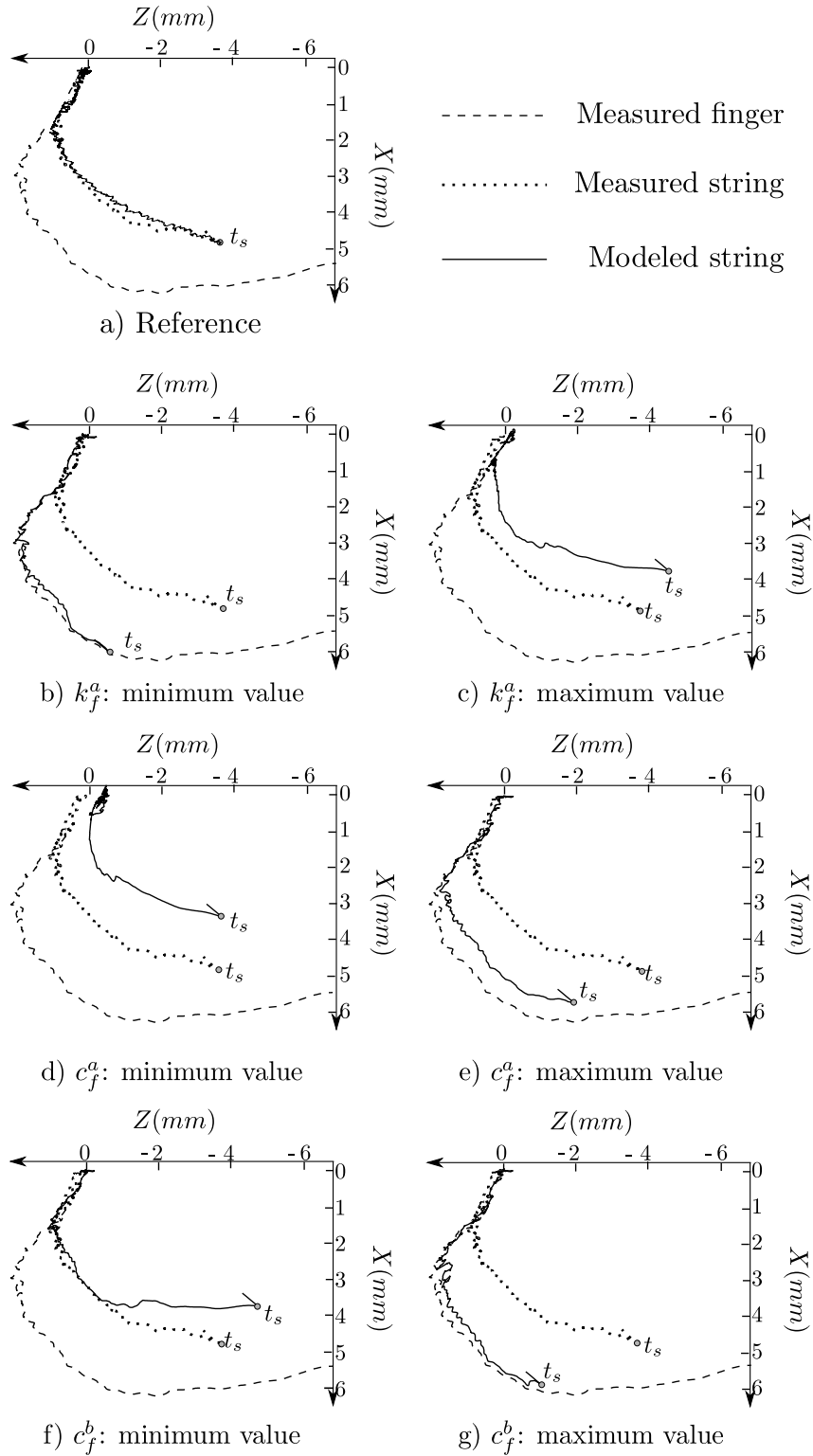


FIGURE 7.7 – Trajectories of the finger and the string estimated through measurements of a robotic plucking action with the A5-fingertip. They are associated to the modeled string trajectory in the (x_0z) plane for a large range of finger's parameters values. a) Reference, b) k_f^a : minimum value, c) k_f^a : maximum value, d) c_f^a : minimum value, e) c_f^a : maximum value, f) c_f^b : minimum value, and g) c_f^b : maximum value.

	F_{max} (N)	δ_s (mm)	μ
D_{tr} (mm)	0.03–7.4	4–2.5	3.3–3.3
V_{tr} (m.s ⁻¹)	0.7–2.1	0.4–2.4	2.7–1.5

TABLE 7.3 – Influence of the plucking parameters on the initial condition of the string vibrations. F_{max} , δ_s and μ are considered to vary from 1N to 10N, from 0.1mm to 2mm, and from 0.87 to 1.0, respectively.

	D_{tr} (mm)	V_{tr} (m/s)
CGS (Hz)	142–151	151–147
σ^2 (Hz)	374–3550	3703–2147

TABLE 7.4 – Influence of the initial condition of the string vibrations D_{tr} and V_{tr} on the spectral descriptors CGS and σ^2 . D_{tr} and V_{tr} are considered to vary from 0.03mm to 7.4mm and from 0.1 to 3m/s.

V_{tr} , while the values investigated are in the ranges 0.03-7.4mm and 0.1-3m/s, respectively. The reported range of values reachable by D_{tr} can imply a variation of 9Hz in the spectral centroid, i.e. about 6% of the fundamental frequency of the studied string (Db2 at about 140Hz). It also impacts the spread of the spectrum which can reach up to 9 times its smallest value. Although the impact of V_{tr} is clearly less important than the one of D_{tr} on the string's oscillations, it is not negligible. Indeed, it can induce a variation of 3% the fundamental frequency in the spectral centroid and the spread of the spectrum can reach up to 1.7 times its smallest value. Let us remark that these results, based on signal processing attributes, are clearly confirmed by informal listening to sound simulations of the string oscillation with the corresponding initial conditions.

7.5.3 Discussion

This parametric study indicates first that the mechanical parameters governing the sticking phase in Fig. 7.2 have a great influence on the string's path during this phase. Hence, they impact the position of the string at the beginning of the slipping phase and consequently at the release time. This is of great importance relatively to the initial angle of polarization of the string's oscillations, and therefore to the sound produced. Then, as for the slipping phase, the three parameters F_{max} , δ_s and μ show a strong influence on the amplitude of the string vibration modes, and the distribution of the energy on the string modes as function of the frequency. The values F_{max} , δ_s , which are directly controlled by the musician, appear to have the strongest influence.

7.6 Application to a musical context

In the previous sections, we have restricted the analysis to isolated plucking actions performed by an artificial finger and by a harpist. The following section discusses the application of

the model to actions performed in a real musical context. For this purpose, we use a finger/string motion database collected on 10 skilled harpists referred to as $H_{1...10}$ performing either arpeggio or chord [Chadefaux et al. 2012c]. Only the plucking by the forefinger or the annular is analyzed. The parameters estimated for these plucking actions are reported Tab. 7.5. There are no significant differences between the plucking positions of the different players, since they all pluck the string at positions between about one-third and two-fifths of the distance from the soundboard to the neck. First, the variability estimated on the mechanical parameters describing the sticking phase is globally high : about 100% for c_f^b and about 50% for k_f^a and c_f^a . Then, regarding the parameters controlling the slipping phase, the variabilities are smaller but still non negligible (about 15%). This indicates that these mechanical parameters are highly dependent on the plucking action, i.e. the harpist control, rather than on the harpist himself.

Because of the high variabilities, no clear result can be highlighted about the parameter c_f^a . However, k_f^a tends to be dependent on the playing technique. Indeed, higher values are computed while playing chord than arpeggio. This is illustrated for instance by harpists $H_{2,3,4}$ and to a lesser extent by harpists $H_{2,8,10}$. Concerning c_f^a , no rule can be extracted from Tab. 7.5. Hence, this would indicate that there is no specific set of mechanical parameters relatively to a harpist, but more probably to a plucking action.

Considering the slipping phase, the maximum force applied by the finger to the string appears to be higher while plucking with the annular than the forefinger. It is most likely explained by a compensation of the weaker control possible with the annular due to morphological reason. This result appears to be also related to the control parameter δ_s . For instance, considering harpists H_2 and H_4 , the smaller δ_s , the smaller F_{max} . Furthermore, regarding the playing technique, trends seem to be specific to harpists. For example, harpist H_3 plays arpeggio with a smaller slipping distance than chord, independently of the playing finger, while δ_s is mostly specific to the finger for harpist H_8 . These results are in agreement with previous ones highlighting that each harpist produces specific plucking actions relatively to the playing context. Furthermore, the playing context induces variations of the control that are bigger than variations amongst players, for one specific musical task. A global survey of the 6 parameters of the model that describe the plucking action from a mechanical point of view indicates that some of them are probably linked in the playing. For instance, when the player touches the string from a longer distance δ_s from the fingertip, it may be induced by the intention to play the note louder. The apparent correlation to a stronger sticking force F_{max} may come from the intention to play louder rather than on mechanical constraints. Therefore, global playing indicators that lump together several parameters of the model could be developed, but ranges out of the scope of the present study.

Harpist	Parameter	Arp-Ann	Arp-For	Ch-Ann	Ch-For
	$k_f^a(\text{N.m}^{-1})$	1504	1484	1611	1808
	$c_f^a(\text{N.s.m}^{-1})$	754	898	491	312
	$c_f^b(\text{m}^{-1})$	173	19	1	82

H_2	$F_{max}(\text{N})$	8.2	6.3	7.5	5.7
	μ	1.2	1.3	1.0	1.3
	$\delta_s(\text{mm})$	0.7	0.5	0.7	0.5
H_3	$k_f^a(\text{N.m}^{-1})$	678	595	2635	1919
	$c_f^a(\text{N.s.m}^{-1})$	483	869	627	364
	$c_f^b(\text{m}^{-1})$	83	18	2	1
	$F_{max}(\text{N})$	4.4	3.9	5.1	4.5
	μ	1.2	1.2	1.1	1.0
	$\delta_s(\text{mm})$	0.6	0.8	1.5	1.5
	$k_f^a(\text{N.m}^{-1})$	657	463	1408	826
	$c_f^a(\text{N.s.m}^{-1})$	647	640	471	644
	$c_f^b(\text{m}^{-1})$	88	38	30	
H_4	$F_{max}(\text{N})$	7.3	3.7		6.7
	μ	1.3	1.0		1.5
	$\delta_s(\text{mm})$	1.2	0.8		
	$k_f^a(\text{N.m}^{-1})$	716	1268	1939	
	$c_f^a(\text{N.s.m}^{-1})$	277	351	312	
	$c_f^b(\text{m}^{-1})$	10	14	73	
	$F_{max}(\text{N})$	7.0	4.5	6.8	
	μ	1.4	1.4	2.5	
	$\delta_s(\text{mm})$	1.2	1.0	1.3	
H_6	$k_f^a(\text{N.m}^{-1})$	605	1153	694	861
	$c_f^a(\text{N.s.m}^{-1})$	568	350	458	565
	$c_f^b(\text{m}^{-1})$		185	30	1
	$F_{max}(\text{N})$	3.7	3.9	2.5	2.7
	μ	1.2	0.8	1.2	0.9
	$\delta_s(\text{mm})$	1.1		0.2	0.4
	$k_f^a(\text{N.m}^{-1})$	721	707	1281	758
	$c_f^a(\text{N.s.m}^{-1})$	908	546	618	694
	$c_f^b(\text{m}^{-1})$	165	1	120	9
H_8	$F_{max}(\text{N})$	4.2	2.8	5.7	4.9
	μ	1.0	1.8	1.0	1.1
	$\delta_s(\text{mm})$	0.9	0.6	0.9	0.5
	$k_f^a(\text{N.m}^{-1})$	317	613	1900	
	$c_f^a(\text{N.s.m}^{-1})$	702	664	525	
	$c_f^b(\text{m}^{-1})$	1	3	16	
	$F_{max}(\text{N})$	6.0		5.4	
H_9	$k_f^a(\text{N.m}^{-1})$	317	613	1900	
	$c_f^a(\text{N.s.m}^{-1})$	702	664	525	
	$c_f^b(\text{m}^{-1})$	1	3	16	
	$F_{max}(\text{N})$	6.0		5.4	

μ		1.1		1.2	
$\delta_s(\text{mm})$		1.2		1.0	
H_{10}	$k_f^a(\text{N.m}^{-1})$	431	261	1814	887
	$c_f^a(\text{N.s.m}^{-1})$	346	942	369	493
	$c_f^b(\text{m}^{-1})$	1	1	38	22
	$F_{max}(\text{N})$	5.0	3.4	3.7	1.3
	μ	1.3	1.2	1.2	1.1
$\delta_s(\text{mm})$		0.9	1.1	1.1	0.2

TABLE 7.5 – Influence of the plucking parameters on the initial conditions of the string vibrations. Note that some boxes are empty because some experimental data are missing or because of post-processing problems. Arp-Ann, Arp-For, Ch-Ann and Ch-For referred to the four musical context investigated, i.e. Arpeggio performed with the annular and the forefinger and chord performed with the annular and the forefinger.

7.7 Conclusion

This paper has presented of model of the plucking action in the case of the concert harp. Measurements of the finger/string interaction have been carried out in order to determine the model parameters, and a parametric study provides the relevance of the model according to the string's free oscillations. The experimental setup was mostly based on the capture of the finger and the string motion in the plane perpendicular to the string's through a high-speed camera. The validity of the model is first discussed on ideal plucking actions performed by a configurable and repeatable robotic finger, enhanced with a silicone layer. Then, the identification of plucking parameters, using the model, has been carried on isolated plucking actions performed by a real harpist, and finally on plucking in real musical contexts.

The model for the finger/string interaction has been split into the two plucking action phases : the sticking and the slipping phases. During the sticking phase, the viscoelastic behavior of the finger is described using the classic Kelvin-Voigt model. The spring's stiffness and the damping of the dash-pot have been investigated as linear and exponential parameters depending on the finger indentation. The combination of a linear stiffness and an exponential damping has been shown to provide the most relevant modeling of the sticking phase. Eventually, a consistent set of mechanical parameters has been pointed out for the various silicone fingers as well as for the harpist fingers. Considering the slipping phase, the friction coefficient between the finger and the string is very tricky to determine accurately. This parameter depends on several variables that were not controllable in our measurements, as the contact angle between the finger and the string or the skin lubrication conditions. However, the values of the friction coefficients estimated for each experimental dataset are very similar, close to values found in the literature. Once the different plucking parameters of the model have been identified, the string and finger paths that are the output of the model, lead to the initial conditions (displacement and velocity) of the free oscillation of the string. The influence of each plucking parameter has been investigated in relation to the initial conditions of the string vibrations. The mechanical parameters governing

the sticking action have been shown to influence greatly the path followed by the string and then its position. The parameters the harpist control directly while plucking are the force applied to the string and the slipping distance. They both are highly influent on the initial displacement and velocity of the string's free oscillations. Finally, the variations reported of the latter imply acoustically relevant differences in the string's oscillations. Therefore, the mechanical parameters intrinsic to the harpist morphology and more specifically the control parameters strongly influence the sound produced. It justifies the musician's claim that they sound different at the individual note level by the way they put the instrument into vibrations. Differences in plucking are expected to induce changes in the spectral content of the sound, as well as on the sound level. Moreover, results indicate that the players produce quite different plucking actions according to the playing context. Those differences may be larger than the differences observed between players for a given musical task.

The rotation of the finger during the sticking phase requires more attention. Indeed, it would be valuable to enhance the model with the string's rotation about its axis and provide a better knowledge of the various control parameters used by the harpist while playing³. Furthermore, an experimental protocol dedicated to the contact between the finger and strings of several diameters and material, as found through the tessiture of the harp, would be of great interest. Finally, a perceptual test would be needed to confirm the influence of the mechanical parameters on the sound produced. Such a test, in relation to the player's technique and musical intention, may help to determine a combination of mechanical parameters that would give rise to global plucking parameters, that are relevant from the point of view of the playing technique.

Friction coefficient of the human skin

The following Tab. 6 and Tab. 7 have been extracted from a recent review of experimental results for the friction coefficient of human skin[Derler and Gerhardt 2012].

3. L'annexe D propose une discussion quant à l'impact de la rotation de la corde sur les oscillations libres de celle-ci.

Finger	Contact	Normal force (N)	μ
Middle[Seo and Armstrong 2009] finger	Dry/Flat surface	1.3-19.6	0.4-1.3
Forefinger[Savescu et al. 2008]	Dry/Flat surface	4.02-11.93	0.33-0.96
Middle[Tomlinson et al. 2011] finger	Wet/Flat surface	0.75-14	1.2-2.5
Forefinger[Bobjer et al. 1993]	Dry/Flat surface	1-20	0.64-2.22
Forefinger, Thumb[Uygur et al. 2010]	Dry/Grip (incipient slip)	3.7-8.8	0.676-1.53
Forefinger, Thumb[Cole et al. 1999]	Dry/Grip (incipient slip)	1.5-7	0.31-1.4

TABLE 6 – Review of experimental results for the friction coefficient of finger skin with various probe materials[Derler and Gerhardt 2012].

Forearm condition	Probe material	Normal force (N)	μ
Dry[Koudine et al. 2000]	Glass	0.05-0.5	0.24-0.75
Dry[S.A. Johnson 1993]	Glass	0.2-0.5	0.26-0.4
Wet[S.A. Johnson 1993]	Glass	0.2-0.5	1.2-1.55
Dry[Asserin et al. 2000]	Ruby	0.2 ± 0.1	0.7 ± 0.07
Dry[Elkhyat et al. 2004]	Glass/Steel/Teflon	0.105	0.18-0.74
Dry[Sivamani et al. 2003]	Steel	0.075-0.4	0.52-0.95
Dry[Adams et al. 2007]	Glass/PP	2	0.23-0.36
Wet[Adams et al. 2007]	Glass/PP	2	1.05-2.62
Dry[Kwiatkowska et al. 2009]	Steel	0.19-0.5	0.7-1.2
Dry[Fotoh et al. 2008]	Steel	0.1	0.8 ± 0.5
Dry[Elleuch et al. 2006]	Steel	0.05 ± 0.03	1.63 ± 0.07

TABLE 7 – Review of experimental results for the friction coefficient of forearm skin contacting with a spherical probe[Derler and Gerhardt 2012].

Quatrième partie

Conclusions et perspectives

Conclusion

Le travail présenté dans ce manuscrit a visé à rendre compte de la gestuelle musicale impliquée dans la pratique de la harpe de concert. La problématique sous-jacente à ce questionnement est double, concernant à la fois la facture instrumentale et le jeu de l'instrument. Elle nous a finalement amené à rechercher les paramètres de contrôle utilisés par les harpistes afin d'interpréter une pièce, mais aussi l'origine des différentes signatures acoustiques propres à chacun d'entre eux. Ainsi, des compétences et outils issus de différentes communautés scientifiques ont été combinés afin d'étudier en détail l'interaction entre le harpiste et son instrument en situation de jeu. Nous revenons ici sur les méthodologies employées ainsi que sur les principaux résultats et limitations mis en lumière lors de ces travaux.

Une importante part de ce travail s'est articulée autour de méthodes expérimentales permettant la capture du geste musical dans toute sa finesse. La mise en place de protocoles de mesures les moins intrusifs possible a ainsi été nécessaire afin d'étudier la gestuelle de musiciens dans un contexte réaliste. Cette partie du travail s'est concentrée sur deux échelles gestuelles : globale, avec l'interaction entre le harpiste et son instrument, et locale, avec le pincement de la corde par l'extrémité du doigt.

Deux résultats souvent observés dans le domaine du mouvement expert ont été montrés : les mouvements du musicien lui sont spécifiques, et s'avèrent particulièrement répétables lors de l'exécution répétée d'une même action. De plus, lors de la mise en vibration de cordes dans un contexte d'accords, il a été observé que le bras du harpiste suit un mouvement d'ensemble régi par l'épaule. La main représente, quant à elle, un élément clef de l'interprétation d'une pièce, manifestement de par son rôle dans le pincement des cordes, mais aussi de par le support qu'elle fournit à l'instrumentiste dans son exécution ainsi que dans sa communication avec l'auditoire. En effet, il a été mis en évidence que les gestes non directement producteurs de son étaient corrélés avec la structure musicale donnée au morceau et révélateurs de certains phénomènes liés à la technique de jeu tels que l'anticipation d'une séquence prochaine.

Concernant le pincement, son déroulement peut se définir en deux séquences temporelles successives, une phase d'accroche et une phase de glissement. Lors de la première, le doigt emmène la corde suivant un chemin particulier jusqu'à atteindre une force suffisante pour provoquer le glissement. Ensuite, alors que le doigt poursuit sa trajectoire, la corde glisse dessus, suivant une direction opposée. A l'instant où le contact entre eux, et par la même occasion le pincement, se termine, la corde commence à osciller librement. L'analyse de ces phases de pincement a permis de montrer que le mouvement des doigts est également répétable et spécifique du doigt

et de la technique de jeu employée. Véritable signature gestuelle du musicien, le mouvement du doigt et donc de la corde, révèle finalement les conditions initiales de son régime vibratoire. Ainsi, contrairement à une idée couramment reçue, les analyses expérimentales ont indiqué que le musicien transmet à la corde de harpe une déformation initiale, mais aussi une distribution de vitesse et de rotation non négligeable. La combinaison de ces trois paramètres de contrôle associés à l'angle initial de la polarisation des oscillations est spécifique à chacun. Ce résultat notable tend à justifier l'existence du phénomène de signature acoustique, non pas uniquement du fait des propriétés expressives transmises à l'auditoire, mais du simple fait de la technique de pincement de la corde.

La seconde partie du travail s'est organisée autour de la validation de la compréhension du pincement d'une corde de harpe et de la mise en évidence des propriétés mécaniques spécifiques pour un instrumentiste donné. Pour ce faire, le pincer d'un véritable harpiste a été reproduit par le biais d'un doigt robotisé et d'une modélisation mécanique.

La conception du doigt robotisé s'est fondée sur un robot basique dont l'extrémité est en mesure de reproduire une consigne en déplacement. La précision et la robustesse de ce robot ont été globalement vérifiées. Cependant, une limitation a été mise en avant lorsque le pincement imposé atteint des forces et des vitesses de déplacements élevées. Dans ces situations, une déviation de la trajectoire attendue est observée. Outre les aspects robotiques à proprement parler, ce doigt artificiel pose la question du matériau et de la forme de la partie en contact avec la corde à utiliser afin de reproduire au mieux un pincement réel. Sachant que les processus de contrôle du geste mis en œuvre avec ce robot diffèrent en grande partie des procédés de contrôle moteur humain, ce matériau n'est pas choisi pour ses propriétés proches de celles du doigt humain, mais en regard uniquement du résultat sonore produit. Ce choix a été effectué par le biais de la comparaison de mesures cinématiques du déplacement du doigt et de la corde, mais aussi de l'analyse des signaux vibratoires transmis à la table d'harmonie de l'instrument par le robot et par un véritable musicien. En étant capable de produire un pincement à la manière d'un véritable harpiste, ce doigt robotisé valide l'interprétation de l'interaction doigt / corde issue de la précédente étude expérimentale. De plus, il sera, à terme, un outil d'une grande utilité dans l'étude des instruments de musique à cordes pincées dans un contexte d'excitation paramétrable, parfaitement répétable, mais aussi et surtout réaliste.

La compréhension de la manière dont un harpiste met en vibrations une corde est également vérifiée par le biais de sa modélisation. Ce procédé a rendu possible la mise en évidence des paramètres mécaniques influents vis-à-vis des conditions initiales des oscillations libres de la corde, et par conséquent, des qualités sonores de la note produite. La modélisation mise en place considère de façon dissociée les deux phases, accroche et glissement, du pincement. Un jeu de paramètres constitué des propriétés visco-élastiques du doigt, de la caractéristique de frottement de la corde sur ce dernier ainsi que du contrôle du musicien gouverne le comportement de ce modèle. L'originalité de l'approche adoptée est la détermination de ces coefficients à partir de données expérimentales et non à partir de leur ajustement jusqu'à obtention d'un résultat sonore satisfaisant. Leurs gammes de valeurs ont été estimées à partir de la base de données de pincements en situation de jeu précédemment étudiée. Une étude paramétrique a finalement

révélé l'impact de ces paramètres sur la répartition de l'énergie sur les modes de vibration de la corde lors de ses oscillations libres. De même, la pertinence de chacun d'entre eux dans la discrimination des musiciens a été mise en exergue.

Perspectives

Les perspectives ouvertes par ce travail se situent tant au niveau expérimental que théorique. Leurs applications sont elles-aussi duales, utiles au scientifique et au musicien.

Tout d'abord, le développement d'une méthode d'analyse du pincement des cordes, à la fois plus légère et moins intrusive que l'utilisation d'une caméra rapide, sera intéressant à plusieurs points de vue. Un complément pourra effectivement être apporté à la contribution du présent travail au travers notamment de l'évolution de la technique de pincement avec le matériau, la géométrie ou encore la position de la corde dans la tessiture de l'instrument. Pour ce faire, un système optique de capture de mouvement est actuellement mis en place sur la harpe de concert. Il s'agit de fourches optiques composées d'une diode électroluminescente et d'un phototransistor. Ce système se révèle être facilement transportable, le rendant également propice à l'étude combinée de la gestuelle de l'instrumentiste et de sa technique d'excitation de corde. Cette association sera pertinente afin de lever la limitation majeure de l'étude proposée ici puisqu'elle permettra d'estimer précisément la relation entre les paramètres de contrôle du pincement employés par l'instrumentiste et sa gestuelle. En effet, les mouvements des doigts des harpistes s'inscrivent, du point de vue de la technique de jeu instrumentale, dans des gestes mettant en jeu l'ensemble des membres supérieurs dans une dynamique temporelle liée au temps musical. Ainsi, cette analyse couplée permettra de quantifier dans quelle mesure l'ensemble des mouvements qui ne sont pas directement liés à la production d'une note, aide le musicien expert dans son interprétation globale. La compréhension de ces mécanismes complexes combinant les mouvements aux retours audio et proprioceptifs pourront avoir des retombées, notamment dans le développement de modèles sensori-moteurs des gestes humains.

Des améliorations et extensions pourront être apportées au doigt robotisé introduit au cours de ce travail. Tout d'abord, le choix du matériau constituant l'embout du doigt ainsi que sa méthode de fabrication devront être affinés. De plus, dans le but d'accéder aux efforts ayant lieu entre le doigt et la corde au cours du pincement, celui-ci sera instrumenté à l'aide de capteurs de force. Afin d'améliorer les performances de ce doigt robotisé, un contrôle en temps réel de la position du doigt est envisagé. L'extension du domaine d'application à d'autres instruments tels que la guitare ou le piano, posant de nombreux problèmes technologiques, sera également traité au cours d'un prochain travail de thèse au sein du laboratoire. Cela passera notamment par le développement de la reproduction de mouvements en trois dimensions, et non plus uniquement plan.

D'autre part, la compréhension du pincement et des paramètres mécaniques pertinents pour le décrire —en fonction du contexte musical dans lequel il s'inscrit— permettra d'améliorer le réalisme des synthèses sonores d'instruments à cordes pincées. En effet, l'initialisation et

le contrôle de celles-ci est un problème encore ouvert. L'introduction de paramètres d'entrée mécaniques dont l'influence sur les vibrations de l'instrument est clairement définie pourront contribuer à le résoudre. L'amélioration du modèle de pincement présenté dans ce manuscrit se fera au travers de l'ajout de la composante de rotation potentiellement appliquée par le musicien sur la corde. Finalement, une étude perceptive des paramètres de ce modèle est également envisagée.

Enfin, du point de vue de l'instrumentiste, deux principales contributions sont à envisager des suites de ce travail. La compréhension de l'influence des paramètres sur lesquels l'instrumentiste joue en pinçant une corde, mais aussi le développement d'outils de visualisation de cette action pourront avoir des retombées vis-à-vis de l'apprentissage de l'instrument. Ces outils pourront, en effet, contribuer à illustrer et à concrétiser le discours de l'enseignant. Par exemple, la mise en avant des différences sonores engagées par le fait d'ouvrir ou de fermer la main après avoir joué un accord, ou encore par le fait de relâcher la pression appliquée sur la corde quelques instants avant de la laisser glisser sur le doigt, pourra être un outil pédagogique intéressant. De même, l'introduction d'un système de suivi en temps réel de la trajectoire des cordes pincées sera utile à l'instrumentiste dans la gestion de son contrôle pour une technique de jeu donnée.

De plus, certains outils développés pourraient s'avérer utiles afin d'approfondir un sujet de réflexion d'ores et déjà abordé dans le milieu de la harpe [Martin 2011]. Il apparaît effectivement que comme pour toutes les activités où le corps humain est sollicité, plusieurs pathologies sont récurrentes chez le harpiste. La tension des cordes de l'instrument, pouvant atteindre des valeurs très élevées par rapport aux autres instruments à cordes pincées, a été mise en cause [Martin 2011]. A partir des méthodes expérimentales déjà employées, mais aussi d'outils tel que l'électromyographie, une mise en évidence des stratégies de gestion et de répartition des efforts pourra être effectuée. Il s'agira alors d'une base intéressante afin de souligner l'origine, éventuellement commune, des douleurs et de permettre ensuite aux instrumentistes d'adapter leur posture ou technique de jeu afin d'y remédier.

Lors de ce travail, nous nous sommes attelés à étudier la répartition des efforts dans le bras uniquement dans le cas d'un jeu expert. Il sera intéressant de poursuivre cette analyse chez les débutants. En effet, il est connu de par l'expérience des professeurs d'instrument que la pratique de la plupart d'entre eux engendre crispations et douleurs chez le débutant, limitant alors le temps de pratique instrumentale lors des premières années. L'étude comparée d'instrumentistes débutants et professionnels, ou à diverses phases de leur formation, devrait permettre de mieux comprendre l'apprentissage et les spécificités cette interaction experte que constitue la pratique d'un instrument en contexte musical.

Par ailleurs, la problématique du cordage de l'instrument est également d'actualité du point de vue du facteur de harpe. Classiquement, on trouve des cordes en nylon, en boyau, ainsi qu'en acier pour les plus graves. Ces dernières années ont vu simultanément la fin de la production de certains type de cordes, notamment en boyau huilées, et l'arrivée de nouveau matériaux tels que les fluorocarbures ou la fibre de carbone. Ainsi, la question de l'influence du type de corde, à la fois sur la technique de jeu mais aussi sur la qualité de la production sonore s'avère être fondamentale. Une étude vibratoire initialisée par un pincement réaliste effectué par le

doigt artificiel associée à une analyse des efforts en jeu dépendamment du matériau de la corde pourront certainement apporter de premiers éléments de réponses.

Bibliographie

- M.J. Adams, B.J. Briscoe, and S.A. Johnson. Friction and lubrication of human skin. *Tribol. Lett.*, 26(3) :239–253, 2007.
- A. Akay. Acoustics of friction. *J. Acoust. Soc. Am.*, 111(4) :1525–1547, 2002.
- H. Asserin, J. Zahouani, P. Humbert, V. Couturaud, and D. Mougin. Measurement of the friction coefficient of the human skin in vivo—quantification of the cutaneous smoothness. *Colloid Surf.*, 19(1) :1–12, 2000.
- R. Bartlett. *Introduction to sports biomechanics, Analysing human movement patterns*. Routledge; 2 edition, 2007. ISBN 0415339936.
- F.J. Bejjani and N. Halpern. Postural kinematics of trumpet playing. *Journal of Biomechanics*, 22(5) :439–446, 1989.
- A.J. Bell. *An acoustical investigation of the concert harp*. PhD thesis, University of St Andrews, United Kingdom, 1987.
- J.P. Bello, L. Daudet, S. Abdallah, C. Duxbury, M. Davies, and M. Sandler. A tutorial on onset detection in music signals. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 13 : 1035–1047, 2005.
- S. Bilbao. *Numerical sound synthesis : Finite Difference Schemes and Simulation in Musical Acoustics*. John Wiley and Sons, Chichester, UK, 2009. ISBN 978-0-470-51046-9.
- S. Billout. *Conception d’un doigt robotisé simulant le pincement du harpiste*, Rapport de stage de fin d’étude d’ingénieur de l’ENSIM à l’Université Pierre et Marie Curie, Paris, France, 2011.
- O. Bobjer, S.-E. Johansson, and S. Piquet. Friction between hand and handle. effects of oil and lard on textured and non-textured surfaces; perception of discomfort. *Appl. Ergon*, 24(3) : 190–202, 1993.

- A. Bouënard. *Synthesis of Music Performances : Virtual Character Animation as a Controller of Sound Synthesis*. PhD thesis, European University of Brittany, France, 2009.
- A. Bouënard, M.M. Wanderley, and S. Gibet. Gesture control of sound synthesis : Analysis and classification of percussion gestures. *Acta Acustica united with Acustica*, 96 :668–677, 2010.
- G. Boyer, H. Zahouani, A. Le Bot, and L. Laquieze. *In vivo*, characterization of viscoelastic properties of human skin using dynamic micro-indentation. *Proceedings of the 29th annual International Conference of the IEEE EMBS*, pages 4584–4587, 2007.
- K. Bradley, M.-H. Cheng, and V.L. Stonik. Automated analysis and computationally efficient synthesis of acoustic guitar strings and body. *IEEE ASSP Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, Mohonk, Mountain House, NY*, 1995.
- C. Cadoz. *Synthèse sonore par simulation de mécanismes vibratoires*. PhD thesis, I.N.P.G., Grenoble, 1979.
- B. Caramiaux. *Études sur la relation geste-son en performance musicale*. PhD thesis, Sciences et Technologies de la Musique et du Son, IRCAM, 2012.
- J. Chabassier. *Modélisation et simulation numérique d'un piano par modèles physiques*. PhD thesis, Ecole Polytechnique, 2012.
- D. Chadeaux, J.L. Le Carrou, B. Fabre, L. Daudet, and L. Quartier. Experimental study of the plucking of the concert harp. In *Proceedings of ISMA*, Sydney, Katoomba, Australia, 2010. ISBN 978-0-646-54052-8.
- D. Chadeaux, J.-L. Le Carrou, M.-A. Vitrani, S. Billout, and L. Quartier. Dropic : A tool for the study of string instruments in playing conditions. In *Proceedings of Acoustics12*, Nantes, France, 2012a.
- D. Chadeaux, J.-L. Le Carrou, M.-A. Vitrani, S. Billout, and L. Quartier. Harp plucking robotic finger (accepted). *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2012b.
- D. Chadeaux, J.L. Le Carrou, B. Fabre, and L. Daudet. Experimentally based description of harp plucking. *J. Acoust. Soc. Am.*, 131(1) :844–855, 2012c.
- D. Chadeaux, M.M. Wanderley, J.L. Le Carrou, B. Fabre, and Daudet. Experimental study of the musician / instrument interaction in the case of the concert harp. In *Proceedings of Acoustics12*, Nantes, France, 2012d.
- A. Chaigne and J. Kergomard. *Acoustique des instruments de musique*. BELIN, 2008. ISBN 978-2-7011-3970-8.
- T.F. Chan and L.A. Vese. Active contours without edges. In *IEEE Transactions on image processing*, volume 10, pages 266–277, 2001.

- P. G. Ciarlet. *The Finite Element Method for Elliptic Problems*. Society for industrial mathematics edition, 2002. ISBN 978-0898715149.
- K.J. Cole, D.L. Rotella, and J.G. Harper. Mechanisms for age-related changes of fingertip forces during precision gripping and lifting in adults. *J. Neurosci*, 19(8) :3238–3247, 1999.
- I. Cossette, B. Fabre, V. Fréour, N. Montgermont, and P. Monaco. From breath to sound : Linking respiratory mechanics to aeroacoustic sound production in flutes. *Acta Acustica united with Acustica*, 96 :654–667, 2010.
- J.-C. Courtier and P. Giacomo. Vocabulaire de la mesure. *Techniques de l’Ingénieur*, R113, 2003.
- M.R. Cutkosky, J.M. Jourdain, and P.K. Wright. Skin materials for robotic fingers. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1649–1653, 1987.
- G. Cuzzucoli and V. Lombardo. A physical model of the classical guitar, including the player’s touch. *Computer Music Journal*, 23(2) :52–69, 1999.
- S. Dahl. Playing the accent - comparing striking velocity and timing in an ostinato rhythm performed by four drummers. *Acustica United with Acta Acustica*, 90(4) :762–776, 2004. ISSN 1610-1928.
- S. Dahl and A. Friberg. Expressiveness of musician’s body movements in performances on marimba. In *Gesture Workshop’03*, pages 479–486, 2003.
- S. Dahl, F. Bevilacqua, R. Bresin, M. Clayton, L. Leante, I. Poggi, and N. Rasamimanana. *Musical Gestures : Sound, Movement, and Meaning*, chapter Gestures in Performance, pages 36–68. Routledge, New York, US, 2009. ISBN 978-0-415-99887-1.
- S. Daltrop, A. Kotlicki, and C. Waltham. Vibro-acoustic characteristics of an aoyama amphion concert harp. *J. Acoust. Soc. Am.*, 128(1) :466–473, 2010.
- B. D’Andréa-Novet, B. Fabre, and P. Jouvelot. *Acoustique Informatique MusiqueE, Outils scientifiques pour la musique*. Mines ParisTech, 2012. ISBN 978-2911256-60-8.
- F. Danion and M.L. Latash. *Motor Control : Theories, Experiments, and Applications*. Oxford University Press, USA, 2011. ISBN 0195395271.
- Serge de Laubier, Guillaume Bertrand, Hugues Genevois, Vincent Goudard, Lionel Feugère, Sylvain Le Beux, and Christophe D’Alessandro. Orjo et ma méta-malette 4.0. In Thierry Dutoit, Todor Todoroff, and Nicolas d’Alessandro, editors, *Actes des Journées d’Informatique Musicale (JIM 2012)*, pages 227–232, Mons, Belgique, 9-11 mai 2012. UMONS/numediart. URL <http://www.jim2012.be>.
- M. Demoucron, A. Askenfelt, and R. Caussé. Measuring bow force in bowed string performance : Theory and implementation of a bow force sensor. *Acta Acustica united with Acustica*, 95 : 718–732, 2009.

- S. Derler and L.C. Gerhardt. Tribology of skin : Review and analysis of experimental results for the friction coefficient of human skin. *Tribol. lett.*, 45 :1–27, 2012.
- S. Derler, U. Schrade, and L-C. Gerhardt. Tribology of human skin and mechanical skin equivalents in contact with textiles. *Wear*, 263 :1112–1116, 2007.
- G. Derveaux, A. Chaigne, P. Joly, and E. Becache. Time-domain simulation of a guitar : Model and method. *J. Acoust. Soc. Am.*, 114(6) :3368–3383, 2003. URL <http://link.aip.org/link/?JAS/114/3368/1>.
- M. Désenfant, M. Priel, and C. Rivier. Evaluation des incertitudes des résultats d’analyse. *Techniques de l’Ingénieur*, P105, 2005.
- D. Deutsch. *The Psychology of Music*. 1982.
- C. Duxbury, J.P. Bello, M. Davies, and M. Sandler. Complex domain onset detection for musical signals. *6th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx)*, 1 : 90–94, 2003. URL <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.57.9197&rep=rep1&type=pdf>.
- S.A. El-Azim. An efficient object tracking technique using block-matching algorithm. In *Radio Science Nineteenth National Conference of the Proceedings of NRSC*, pages 427–433, Alexandria, Egypt, 2002.
- A. Elkhyat, C. Courderot-Masuyer, T. Gharbi, and P. Humbert. Influence of the hydrophobic and hydrophilic characteristics of sliding and slider surfaces on friction coefficient : in vivo human skin friction comparison. *Skin Res. Technol.*, 10(4) :215–221, 2004.
- K. Elleuch, R. Elleuch, and H. Zahouani. Comparison of elastic and tactile behavior of human skin and elastomeric materials through tribological tests. *Polym. Eng. Sci.*, 46(12) :1715–1720, 2006.
- A. Emmanuel. *La harpe : son évolution ses facteurs*. Dessain et tolra edition, 1990. ISBN 2249251053.
- K.A. Ericsson, R. Th. Krampe, and C. Tesch-Römer. The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological Review*, 100 :363–406, 1993.
- G. Evangelista. Player-instrument interaction models for digital waveguide synthesis of guitar : touch and collisions. *IEEE Transactions on audio, speech and language processing*, 18(4) : 822–832, 2010.
- B. Fabre, F. Guillard, M. Solomon, Blanc F., and V. Sidorenkov. Structuring music in recorder playing : a hydrodynamical analysis of blowing control parameters. In *Proceedings of ISMA*, Sydney, Katoomba, Australia, 2010.

- D. Ferrand and C. Vergez. Blowing machine for wind musical instrument : toward a real-time control of the blowing pressure. In *16th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation*, pages 1562–1567, Ajaccio, France, 2008.
- D. Ferrand, C. Vergez, B. Fabre, and F. Blanc. High-precision regulation of a pressure controlled artificial mouth : the case of recorder-like musical instruments. *Acta Acustica united with Acustica*, 96 :700–711, 2010.
- L. Feugère and C. D’Alessandro. Digitartic : synthèse gestuelle de syllabes chantées. In *Journées d’Informatique Musicale (JIM)*, Mons, Belgique, 2012.
- I.M. Firth. On the acoustics of the harp. *Acustica*, 37 :148–154, 1977.
- T. Flash. *Organizing principles underlying the formation of hand trajectories*. PhD thesis, Massachusetts Institute of technology, Cambridge, US, 1983.
- T. Flash and N. Hogan. The coordination of arm movements : An experimentally confirmed mathematical model. *Journal of neuroscience*, 5 :1688–1703, 1985.
- N.H. Fletcher. Plucked strings - a review. *Catgut Acoust. Soc. Newsletter*, 26 :13–17, 1976.
- N.H. Fletcher. Analysis of the design and performance of harpsichords. *Acustica*, 37 :139–147, 1977.
- N.H. Fletcher and T.D. Rossing. *The Physics of Musical Instruments*. Springer, New York, US, second edition, 1998.
- C. Ftooh, A. Elkhyat, S. Mac, and P. Sainthillier, J.M. Humbert. Cutaneous differences between black, african or caribbean mixed-race and caucasian women : biometrological approach of the hydrolipidic film. *Skin Res. Technol.*, 14(3) :327–335, 2008.
- S. Félicité Comtesse de Genlis. *Nouvelle méthode pour la harpe*. 1802.
- H. Genevois and R. de Vivo. *Les nouveaux gestes de la musique*. Marseille, France, 1999. ISBN 2-86364-616-8.
- J. Gilbert, S. Ponthus, and J.F. Petiot. Artificial buzzing lips and brass instruments : experimental results. *J. Acoust. Soc. Am.*, 104(3) :1627–1632, 1998.
- N. Giordano and J.P. Winans II. Plucked strings and the harpsichord. *Journal of Sound and Vibration*, 224(3) :455–73, 1999.
- R.I. Godøy and M. Leman. *Musical Gestures : Sound, Movement, and Meaning*. Routledge, New York, US, 2009. ISBN 978-0-415-99887-1.
- J.M. Grey and J.W. Gordon. Perceptual effects of spectral modification on musical timbres. *J. Acoust. Soc. Am*, 63 :1493–1500, 1978.

- A. Griffiths and J. Rimmer. *The Grove Dictionary of Music and Musicians*, volume 10. Sadie and Tyrrel, London, second edition, 2001. ISBN 978-2-7011-3970-8.
- A. Gritten and E. King. *Music and Gesture*. Ashgate, Surrey, England, 2006. ISBN 978-0-7546-5298-4.
- R.J. Gulati and M.A. Srinivasan. *Determination of mechanical properties of the human fingerpad in vivo using a tactile stimulator*. PhD thesis, RLE Technical Report, Massachusetts Institute of Technology, 1997.
- H.Y. Han, A. Shimada, and S. Kawamura. Analysis of friction on human fingers and design of artificial fingers. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3061–3066, Minneapolis, US, 1996.
- N. Hogan. An organizing principle for a class of voluntary movements. *Journal of neuroscience*, 4 :2745–2754, 1984.
- A. Hreljac. The relationship between smoothness and performance during the practice of a lower limb obstacle avoidance task. *Biol. Cyb.*, 68 :375–379, 1993.
- M. Imberty and M. Gratier. *Temps, geste et musicalité*. Paris, France, 2007. ISBN 978-2296038516.
- A. Izadbakhsh. *Dynamics and control of a piano action mechanism*, Master thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada, 2006.
- A.R. Jensenius, M.M. Wanderley, R.I. Godøy, and M. Leman. *Musical Gestures : Sound, Movement, and Meaning*, chapter Musical Gestures : concepts and methods in research, pages 12–35. Routledge, New York, US, 2009. ISBN 978-0-415-99887-1.
- D.L. Jindrich, Y. Zhou, T. Becker, and J.T. Dennerlein. Non-linear viscoelastic models predict fingertip pulp force-displacement characteristics during voluntary tapping. *Journal of Biomechanics*, 36 :497–503, 2003.
- M. Kajitani. Development of musician robots in japan. In *Proceedings of the Australian Conference on Robotics and Automation*, Brisbane, Australia, 1999.
- A. Kapur. A history of robotic musical instruments. In *Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC)*, Barcelona, Spain, 2005.
- M. Karjalainen, V. Välimäki, and T. Tolonen. ‘plucked-string models : From the karplus-strong algorithm to digital waveguides and beyond. *Computer Music Journal*, 22(3) :17–32, 1998.
- W. Khalil and E. Dombre. *Modeling, Identification and control of robots*. Hermès Penton, New York, US, 2002. ISBN 978-1903996669.
- A.A. Koudine, M. Barquins, Ph. Anthoine, L. Aubert, and J.-L. Lévêque. Frictional properties of skin : proposal of a new approach. *International Journal of Cosmetic Science*, 22 :11–20, 2000.

- M. Kwiatkowska, S.E. Franklin, C.P. Hendriks, and K. Kwiatkowski. Friction and deformation behaviour of human skin. *Wear*, 267 :1264–1273, 2009.
- C. Lambourg and A. Chaigne. Measurements and modeling of the admittance matrix at the bridge in guitars. In *Proceedings of the SMAC 93*, pages 448–453, Stockholm, Sweden, 1993.
- J.-L. Le Carrou. *Calcul d'incertitudes*, Métrologie des phénomènes sonores, Cours de M2 Ingénierie Acoustique à l'Université Pierre et Marie Curie, Paris, France, 2011.
- J.L. Le Carrou. *Vibro-acoustique de la harpe de concert (Vibro-acoustics of the concert harp)*. PhD thesis, Université, du Maine, Le Mans, France, 2006.
- J.L. Le Carrou, F. Gautier, and E. Foltê, te. Experimental study of ao and t1 modes of the concert harp. *J Acoust Soc Am*, 121(1) :559–567, 2007a.
- J.L. Le Carrou, F. Gautier, F. Kerjan, and J. Gilbert. The string-finger interaction in the concert harp. In *Proceedings of ISMA*, Barcelona, Spain, 2007b.
- J.L. Le Carrou, E. Wahlen, E. Brasseur, and J. Gilbert. Two dimensional finger-string interaction in the concert harp, 2008.
- J.L. Le Carrou, F. Gautier, and R. Badeau. Sympathetic string modes in the concert harp. *Acta Acustica united with Acustica*, 95 :744–752, 2009.
- J.L. Le Carrou, Q. Leclere, and F. Gautier. Some characteristics of the concert harp's acoustic radiation. *J. Acoust. Soc. Am.*, 127 :3203–3211, 2010.
- E. Leipp. *Acoustique et Musique*. Presses de l'Ecole des mines, cinquième edition, 2011. ISBN 978-2911256394.
- K. Levenberg. A method for the solution of certain problems in least squares. *Quart. Appl. Math.*, 2 :166–168, 1944.
- F. Mainardi and G. Spada. Creep, relaxation and viscosity properties for basic fractional models in rheology. *Eur. Phys. J. Special Topics*, 193 :133–160, 2011.
- D.W. Marhefka and D.E. Orin. A compliant contact model with nonlinear damping for simulation of robotic systems. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and humans*, 29(6), 1999.
- D. Marquardt. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *SIAM J. Appl. Math.*, 11 :431–441, 1963.
- R. Martin. *Tension/détente de la posture du harpiste en Europe occidentale*, Travaux de recherche de l'Institut Médecine des arts, Paris, France, 2011.
- C.S. McGinnis and C. Gallagher. The mode of vibration of a clarinet reed. *J. Acoust. Soc. Am.*, 12 :529–531, 1941.

- P.M. Morse. *Vibration and Sound*. McGraw-Hill Book Company, 1948.
- N. Nakazawa, R. Ikeura, and H. Inooka. Characteristics of human fingertips in the shearing direction. *Biol. Cyb.*, 82 :207–214, 2000.
- W.L. Nelson. Physical principles for economies of skilled movements. *Biol. Cyb.*, 46 :135–147, 1983.
- O. Ortmann. *The Physiological Mechanics of Piano Technique*. E.P. Dutton, New-York, 1929.
- R. Parncutt, J. Sloboda, E. Clarke, M. Raekallio, and P. Desain. An ergonomic model of keyboard fingering for melodic fragments. *Music Perception*, 14 :341–382, 1997.
- M. Pavlidou. *A physical model of the string-finger interaction on the classical guitar*. PhD thesis, University of Wales, Cardiff, United-Kingdom, 1997.
- D.T.V. Pawluk and R.D. Howe. Dynamic lumped element response of the human fingerpad. *Journal of the biomechanical engineering*, 121 :178–183, 1999.
- G. Peeters, B. Giordano, P. Susini, N. Misdariis, and St. McAdams. The timbre toolbox : Audio descriptors of musical signals. *J. Acoust. Soc. Am.*, 130(5) :2902–2916, 2011.
- H. Penttinen, J. Pakarinen, and V. Välimäki. Model-based sound synthesis of the guqin. *J. Acoust. Soc. Am.*, 120(6) :4052–4063, 2006.
- K. Petersen, K. Solis, and A. Takanishi. Musical-based interaction system for the waseda flutist robot - implementation of the visual tracking interaction module. *Autonomous Robots*, 28(4) : 471–488, 2010.
- I. Poggi. Body and mind in the pianist’s performance. In *Proceedings of the 9th International Conference on Music Perception and Cognition (ICMPC9)*, pages 1044–1051, Bologna, Italy, 2006.
- M. Priel. Incertitudes de mesure et tolérances. *Techniques de l’Ingénieur*, R285, 1999.
- R. Raikova. A general approach for modelling and mathematical investigation of the human upper limb. *Journal of Biomechanics*, 25(8) :857–867, 1992.
- N.H. Rasamimanana, E. Fléety, and F. Bevilacqua. Gesture analysis of violin bow strokes. In *Lecture Notes in Computer Science*, volume 3881, pages 145–155. Springer Verlag, 2006.
- R. Rensch. *The harp, Its History, Technique and Repertoire*. Praeger, New York, US, 1969.
- L. Rhaouti, A. Chaigne, and P. Joly. Time-domain modeling and numerical simulation of a kettledrum. *J. Acoust. Soc. Am.*, 105 :3545–3562, 1999.
- R. Riener and A. Straube. Inverse dynamics as a tool for motion analysis : arm tracking movements in cerebellar patients,. *Journal of Neuroscience Methods*, 72(1) :87–96, 1997. ISSN 01650270. doi : 10.1016/S0165-0270(96)02168-1. URL [http://dx.doi.org/10.1016/S0165-0270\(96\)02168-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0165-0270(96)02168-1).

- M.J. Adams B.J. Briscoe S.A. Johnson, D.M. Gorman. *The friction and lubrication of human stratum corneum*, volume 25, pages 663–672. Institute of Tribology, University of Leeds, Elsevier, Amsterdam, 1993.
- H. Sakoe and S. Chiba. Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition. In *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, volume 26, pages 43–49, 1978.
- E. Saltzman. Levels of sensorimotor representation. *Journal of Mathematical Psychology*, 20 : 91–163, 1979.
- F.A. Saunders. The mechanical action of violins. *J. Acoust. Soc. Am.*, 9(2) :81–98, 1937.
- A.V. Savescu, M.L. Latash, and V.M. Zatsiorsky. A technique to determine friction at the finger tips. *J. Appl. Biomech.*, 24(1) :43–50, 2008.
- K. Schneider and R.F. Zernicke. Jerk-cost modulations during the practice of rapid arm movements. *Biol. Cyb.*, 60 :221–230, 1989.
- N.J. Seo and T.J. Armstrong. Friction coefficients in a longitudinal direction between the finger pad and selected materials for different normal forces and curvatures. *Ergonomics*, 52(5) : 609–616, 2009.
- E.R. Serina, S.D. Mote Jr., and D. Rempel. Force response of the fingertip pulp to repeated compression - effects of loading rate, loading angle and anthropometry. *Journal of Biomechanics*, 30(10) :1035–1040, 1997.
- F. Shao, T.H.C. Childs, and B. Henson. Developing and artificial fingertip with human friction properties. *Tribology international*, 42 :1575–1581, 2009.
- K. Shibuya, S. Matsuda, and A. Takahara. Toward developing a violin playing robot - bowing by anthropomorphic robot arm and sound analysis. In *IEEE International Conference on Robot & Human Interactive Communication*, Jeju, Korea, 2007.
- R.K. Sivamani, J. Goodman, N.V. Gitis, and H.I. Maibach. Friction coefficient of skin in real-time. *Skin Research and technology*, 9 :235–239, 2003.
- J.A. Sloboda. *The musical mind*. Oxford University Press, USA, 1986. ISBN 0198521286.
- T. Smit, F. Türckeim, and R. Mores. A highly accurate plucking mechanism for acoustical measurements of stringed instruments. *J. Acoust. Soc. Am.*, 127 :222–226, 2010.
- J.O. Smith III. *Handbook of Signal Processing in Acoustics*, chapter Digital Waveguide Architectures for Virtual Musical Instruments, pages 399–417. Springer, 2008. ISBN 978-0-387-77698-9.
- T.M. Sobh, B. Wang, and K.W. Coble. Experimental robot musicians. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 38(2) :197–212, 2003.

- J. Solis, K. Chida, K. Taniguchi, S.M. Hashimoto, K. Suefuji, and A. Takanishi. The waseda flutist robot wf-4rri in comparison with a professional flutist. *Comput. Music J.*, 30(4) :12–27, December 2006. ISSN 0148-9267. doi : 10.1162/comj.2006.30.4.12. URL <http://dx.doi.org/10.1162/comj.2006.30.4.12>.
- S.E. Tomlinson. *Understanding the friction between human fingers and contacting surfaces*. PhD thesis, University of sheffield, United Kingdom, 2009.
- S.E. Tomlinson, R. Lewis, X. Liu, and M.J. Carré. Understanding the friction mechanisms between the human finger and flat contacting surfaces in moist conditions. *Tribol. Lett.*, 41(1) :283–294, 2011.
- C. Traube and J.O. Smith III. Estimating the plucking point on a guitar string. In *Proceedings of the COST G-6 Conference on Digital Audio Effects (DAFX-00)*, pages 153–158, Verona, Italy, 2000.
- M. Uygur, P.B. De Freitas, and S. Jaric. Frictional properties of different hand skin areas and grasping techniques. *Ergonomics*, 53(6) :800–817, 2010.
- C. Valette. *Mechanics of musical instruments*, chapter The Mechanics of Vibrating Strings, pages 115–183. Springer-Verlag, Wien, New-York, 1995. ISBN 3-211-82801-X.
- V. Verfaillie, M.M. Wanderley, and P. Depalle. Mapping strategies for gestural and adaptive control of digital audio effects. *Journal of New Music Research*, 35 :71–93, 2006.
- C. Waltham and A. Kotlicki. Vibrational characteristics of harp soundboards. *J. Acoust. Soc. Am.*, 124(3) :1774–1780, 2008.
- M.M Wanderley, B. Vines, N. Middleton, and C. McKay. The musical significance of clarinetists’ ancillary gestures : An exploration of the field. *Journal of New Music Research*, 34 :97–113, 2005.
- Q. Wang and V. Hayward. In vivo biomechanics of the fingerpad skin under tangential traction. *Journal of Biomechanics*, 40 :851–860, 2007.
- A. Watsky. *Sur la vibration linéaire des fils précontraints (cordes, verges tendues)*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6), 1992.
- A.W. Wiegner and M.M. Wierzbicka. Kinematic models and human elbow flexion movements : Quantitative analysis. *Exp Brain Res*, 88 :665–673, 1992.
- A. Williamon. *Musical excellence : strategies and technique to enhance performance*. Oxford University Press, USA, 2004. ISBN 0198525354.
- H. Winold, E. Thelen, and B.D. Ulrich. Coordination and control in the bow arm movements of highly skilled cellists. *Ecological Psychology*, 6 :1–31, 1994.

- D.A. Winter. *Biomechanics and Motor Control of Human Movement, Fourth Edition*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 2009.
- J. Woodhouse. On the synthesis of guitar plucks. *Acta Acustica united with Acustica*, 90 : 928–944, 2004a.
- J. Woodhouse. Plucked guitar transients : comparison of measurements and synthesis. *Acta Acustica united with Acustica*, 90 :945–965, 2004b.
- D. Young and A. Deshmane. Bowstroke database : a web-accessible archive of violin bowing data.

Cinquième partie

Annexes

Annexe A

Contextes expérimentaux

A.1 Protocoles de mesures

Le chapitre 4 de ce manuscrit présente deux approches expérimentales visant à l'étude de l'interaction entre le harpiste et son instrument. Les protocoles proposés aux harpistes lors de ces séances de mesures sont présentés dans cette annexe. Le premier, qui a donné lieu aux analyses du chapitre 4 a impliqué la capture d'une quantité d'informations beaucoup plus importantes que celle qui a finalement pu être traitée. Les données relatives aux enregistrements de la *Danse Profane* de Claude Debussy et de la cadence du *Casse-Noisette* de Piotr Ilitch Tchaïkovsky constituent une perspective du travail fourni ici. En effet, l'étude d'autres mouvements de la *Danse Profane* permettra d'approfondir la problématique de la gestuelle musicale en fonction de la technique de jeu employée. Les deux mains de l'instrumentiste y sont impliquées simultanément, et ce dans des passages plus ou moins rapides. Ce morceau comporte également des passages en harmoniques, nécessitant une technique de jeu différente de celle déjà analysée. D'autre part, l'analyse de la cadence du *Casse-Noisette*, interprétée de trois manières différentes par chaque harpiste, sera intéressante afin de mettre en évidence leurs stratégies gestuelles afin de transmettre une intention musicale. Cependant, les captures de mouvements n'ont pas pu être effectuées dans le cas des performances des séquences d'accords et d'arpèges déjà analysées au chapitre 5. En effet, le but de ces mesures étaient de capturer de manière synchronisée les mouvements du bras et des doigts du musicien. Or, il s'est avéré que les plus petits marqueurs réfléchissant à notre disposition étaient d'un diamètre de 3mm. Leur présence sur les ongles du harpiste ne l'empêchait pas de jouer mais, d'après leurs dires, ils devaient adapter leur technique de jeu à ce nouveau contexte. Par conséquent, ces mesures n'ont pas été exploitées.

Measurements protocol

March-April 2011

The current study aims at studying the global posture and the gestures of harp players. This experiment is divided into three parts. During each of them, you will be filmed by two classical cameras, the produced sound will be recorded by two microphones and finally your motion will be captured.

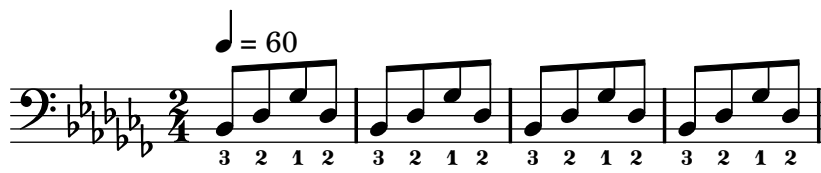
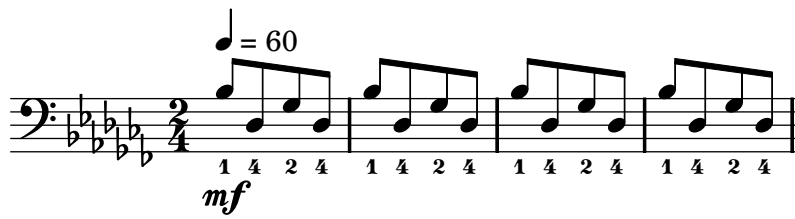
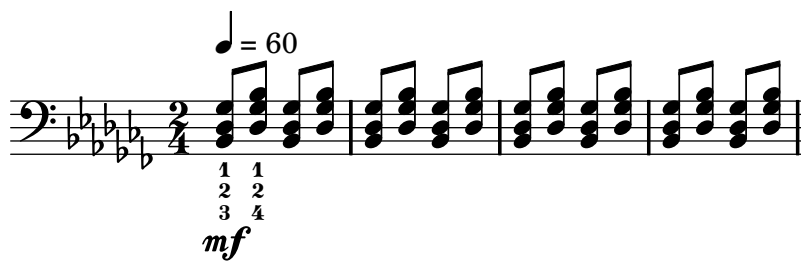
The motion capture system tracks the position of infra-red reflective markers in space. This method imply reflective markers to be as close as possible to the body. That is why the harpist will have to wear tight clothes (lycra-like), preferably dark. If you do not have this kind of clothes, we will provide you some. The following links present the system (<http://www.youtube.com/watch?v=2uDnW4AtFiE&feature=related>), and an example of motion capture (<http://www.youtube.com/watch?v=guLX2dTC6Sg&feature=related>) with deduced results (<http://www.youtube.com/watch?v=W69LxKA0BdQ&feature=related>) for a previous study at IDMIL laboratory about violin performances.

The first part of the measurement session consists in playing basical arpeggios and chords sequences. Each sequence (proposed below) will be repeated during about 15 secondes, with right and left hand. It will help us acquiring better knowledge about the harpist's classical posture.

The second part consists in performing *La Danse profane* from *Les Danses sacrée et profane* (Debussy). Due to technical issues, the whole piece will not be recorded in one time, but divided into several parts. The chosen parts are joined to the present document. These measurements aim at completing the previous ones in order to have clues about the evolution of the classical gestures according to the musical context.

The last part aims at studying gestures which do not produce any sound in a direct way, but which seem to be part of musician performances: expressive gestures. In this case, the cadenza of the *Nutcracker* (Tchaïkovsky) will be performed in three different ways: with normal, exaggerated, and inexpressive gestures.

Finally, each performance will be repeated several times (depending on the time left) in order to have a consistent number of recorded samples.

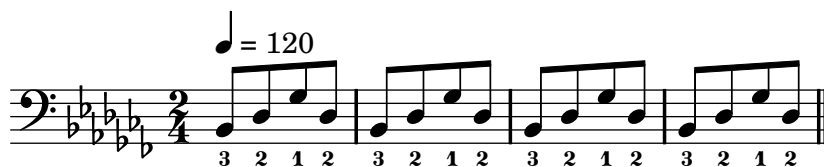
Basic arpeggios and chords sequences:**Arpeggios: Seq. 1:****Arpeggios: Seq. 2:****Chords:**

Thank you for your contribution!

Protocole de mesures

Juin-Juillet 2010

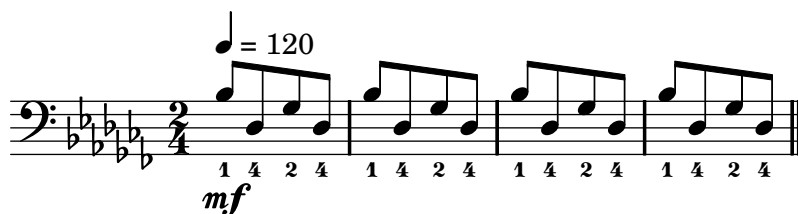
- Film : Re b 5ieme octave



- Re b 2ieme, puis 3ieme et 4ieme octave

8 pincements de type préparé, mezzo forte, avec le doigté 2, 4, 1, en arrêtant la vibration de la corde entre chaque note

- Film : Re b 5ieme octave



- Re b 6ieme octave :

8 pincements de type préparé, mezzo forte, avec le doigté 2, 4, 1, en arrêtant la vibration de la corde entre chaque note

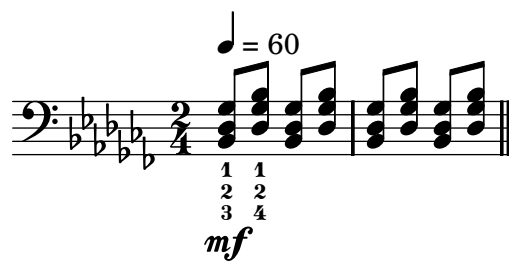
- Crescendo et Decrescendo : gamme avec les cordes initialement bien étouffées



- Crescendo et Decrescendo

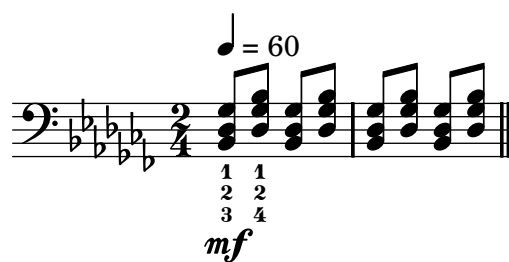
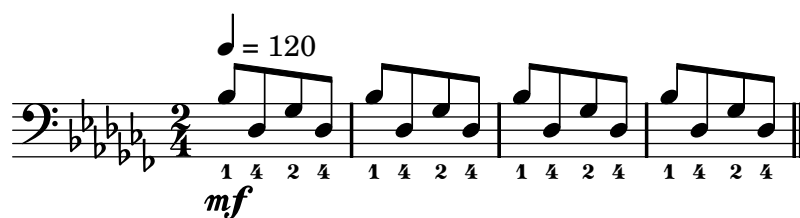
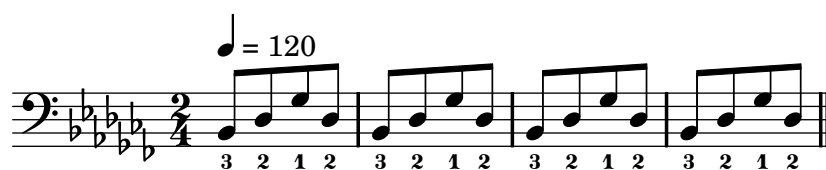
Les cordes initialement bien étouffées, répéter la corde de Do b 4ieme octave, de *pianississimo* à *fortississimo*

- Film : Re b 5ieme octave



- Re b 5ieme octave

8 pincements de type préparé, mezzo forte, avec le doigté 2, 4, 1, en arrêtant la vibration de la corde entre chaque note



Merci de votre participation !

A.2 Positionnement des marqueurs

Lors de la série de mesures présentée au chapitre 4, un système Vicon de capture de mouvements a été utilisé. Il est constitué de six caméras infrarouges. Ainsi, la capture de la gestuelle du musicien s'est effectuée par l'intermédiaire de marqueurs réfléchissants fixés sur ce dernier. Leurs positionnements sur le corps des harpistes ont été effectués en accord avec le modèle proposé figure A.1. Remarquons cependant que, dans l'application présente de la capture des mouvements de harpistes en situation de jeu, l'intégralité des marqueurs présentés figure A.1 n'a pas été disposée sur les musiciens. Notamment ceux situés sur la poitrine et sur la tête du fait de la présence de la harpe d'une part et des paramètres de capture (échantillonnage temporel) restreignant le champ capté d'autre part.

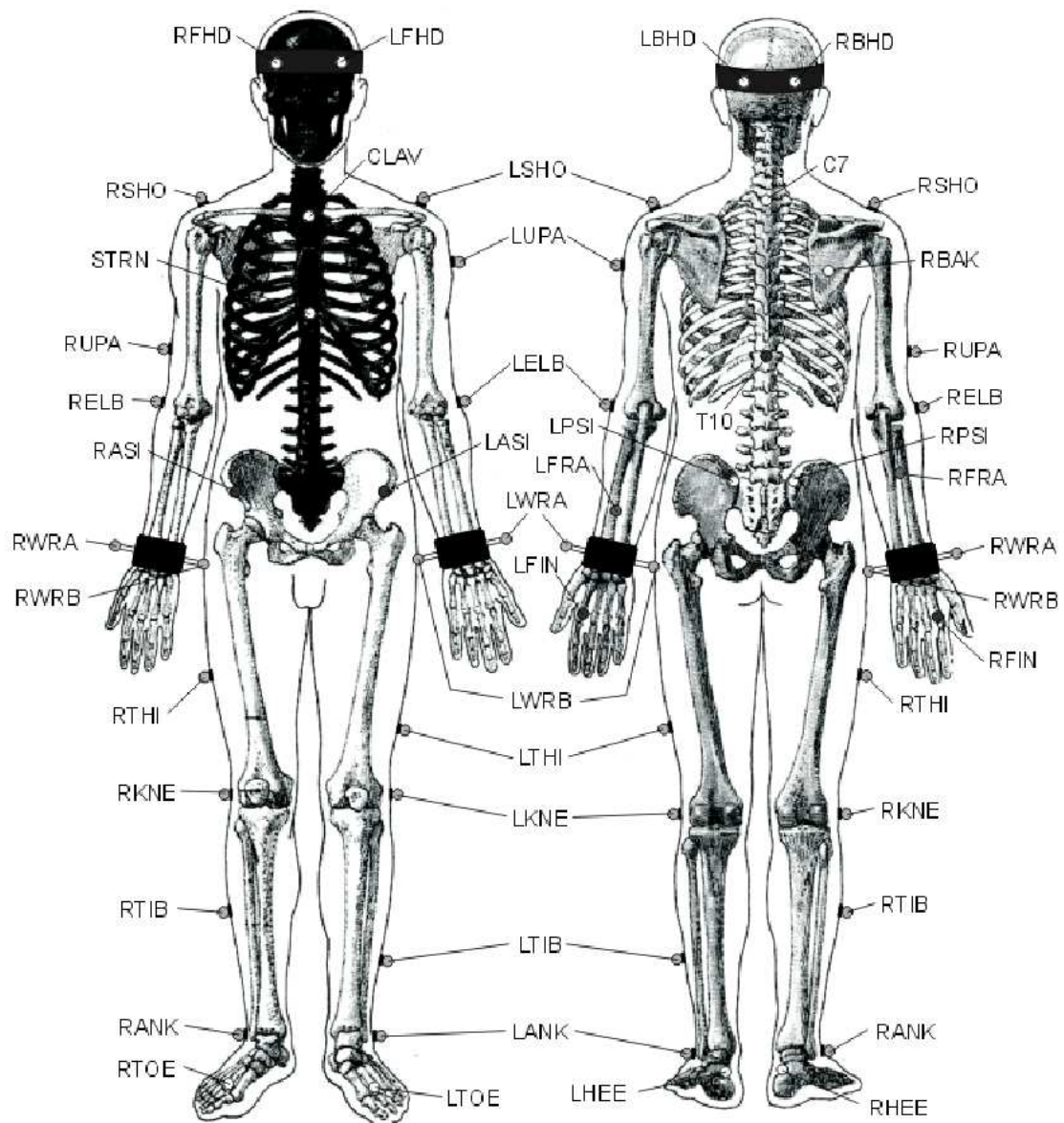


FIGURE A.1 – Positions des marqueurs réfléchissant sur le corps du musicien. Plug-in-Gait marker placement protocol, Vicon.

Annexe B

Répétabilité des gestes musicaux

Nous apportons dans cette annexe un complément à l'étude proposée au chapitre 4. Les figures B.1, B.2 et B.3 présentent les déplacements de la main du musicien dans les plans (y0z), (x0y) et (x0z) définis figure 4.2. Les trois répétitions $T_{1,2,3}$ de l'extrait effectuées par chacun des harpistes $H_{1,2,3}$ y sont proposées.

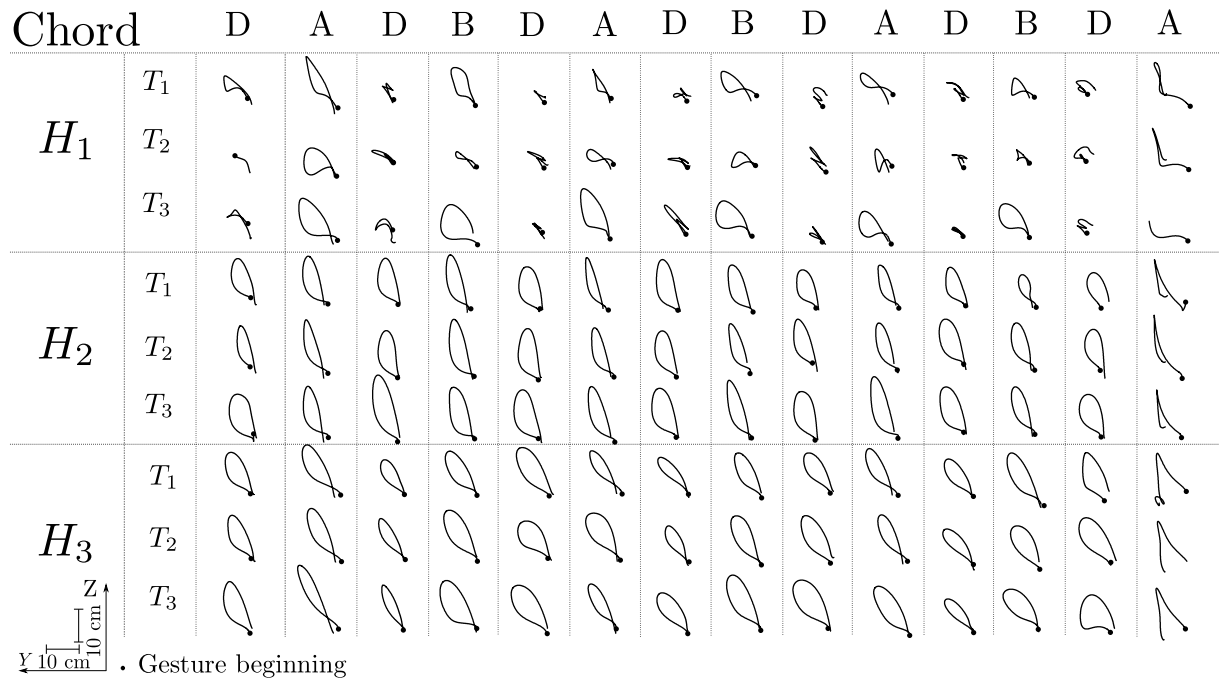


FIGURE B.1 – Répétabilité et caractéristiques des mouvements effectués par la main gauche du harpiste dans le plan (y0z). Ces mesures ont été effectuées à trois reprises sur l'extrait étudié de la *Danse Profane* de C. Debussy.

Chord		D	A	D	B	D	A	D	B	D	A	D	B	D	A
H_1	T_1														
	T_2														
	T_3														
H_2	T_1														
	T_2														
	T_3														
H_3	T_1														
	T_2														
	T_3														

. Gesture beginning

FIGURE B.2 – Répétabilité et caractéristiques des mouvements effectués par la main gauche du harpiste dans le plan (x0y). Ces mesures ont été effectuées à trois reprises sur l'extrait étudié de la *Danse Profane* de C. Debussy.

Chord		D	A	D	B	D	A	D	B	D	A	D	B	D	A
H_1	T_1														
	T_2														
	T_3														
H_2	T_1														
	T_2														
	T_3														
H_3	T_1														
	T_2														
	T_3														

. Gesture beginning

FIGURE B.3 – Répétabilité et caractéristiques des mouvements effectués par la main gauche du harpiste dans le plan (x0z). Ces mesures ont été effectuées à trois reprises sur l'extrait étudié de la *Danse Profane* de C. Debussy.

Ainsi, quel que soit le plan d'étude, la répétabilité des mouvements produits par chacun

est une nouvelle fois mise en évidence. Ceci justifie le fait d'avoir restreint l'analyse à une seule exécution du morceau au cours du chapitre 4. Les mouvements particuliers repérés alors à la figure 4.5 comme liés aux phénomènes d'anticipation sont donc bien valables à chaque exécution du dernier accord. De plus, la spécificité du mouvement du musicien est une nouvelle fois soulignée par ces figures, notamment dans les plans $(x0y)$ et $(x0z)$.

Annexe C

Mesures des déplacements de corde

Au cours des travaux présentés dans ce manuscrit, plusieurs séries de films ont été effectuées avec une caméra rapide dans le but de déterminer le déplacement d'un objet dans l'espace tel qu'une corde ou un doigt (chapitres 5 et 6). La détermination de ces trajectoires ainsi que les incertitudes introduites sont présentées dans cette annexe.

C.1 Détermination de la trajectoire d'un objet

C.1.1 Exposition du problème et notations

La mesure consiste à filmer l'objet dont le mouvement est étudié à l'aide d'une caméra rapide. La vue directe donne accès à son déplacement dans le plan image de la caméra, c'est-à-dire dans le plan repéré par les vecteurs $(\vec{e}_x, \vec{e}_y)$ dans la figure C.1-a). La troisième composante du mouvement est détectée grâce à un miroir disposé à un angle θ_2 de $\vec{e}_x$. Les images obtenues par la caméra rapide, dont un exemple est proposée figure 5.2, sont ainsi constituées de deux parties, l'une correspondant à la vue directe, et l'autre à la vue dans le miroir.

Le protocole de mesures mis en place afin d'estimer la trajectoire de l'objet dans l'espace est schématisé figures C.1-a) et C.1-b). Il est repéré à chaque instant par le point P de coordonnées (P_x, P_y, P_z) dans le repère $(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$. Sa position initiale est prise pour origine O. Ainsi, les composantes $x(t)$, $y(t)$, et $z(t)$ du vecteur déplacement $\vec{OP}(t)$ sont à déterminer au cours de la séquence étudiée. On note $\tilde{x}(t)$ et $\tilde{y}(t)$ les déplacements horizontaux et verticaux accessibles dans la zone de l'image correspondant à la vue directe, et $\tilde{z}(t)$ le déplacement horizontal dans la vue miroir. On note $\tilde{O}\tilde{P}_x(t)$ et $\tilde{O}\tilde{P}_y(t)$ leur correspondance en mètres.

Afin d'exprimer la relation entre les déplacements réels recherchés $(x(t), y(t)$ et $z(t))$ et évalués $(\tilde{x}(t), \tilde{y}(t)$ et $\tilde{z}(t))$, on introduit les grandeurs suivantes :

- β : angle entre le vecteur image $\vec{OP}'$ et de sa projection suivant l'axe z $\vec{OP}'_z$,
- θ_1 : angle entre le plan image et le plan de mesures,
- θ_2 : angle entre le miroir et le plan des cordes,
- θ_3 : angle entre le plan image et la verticale,
- c : distance entre le plan des cordes et le côté gauche de la caméra,
- d : distance entre le plan des cordes et le côté droit de la caméra,

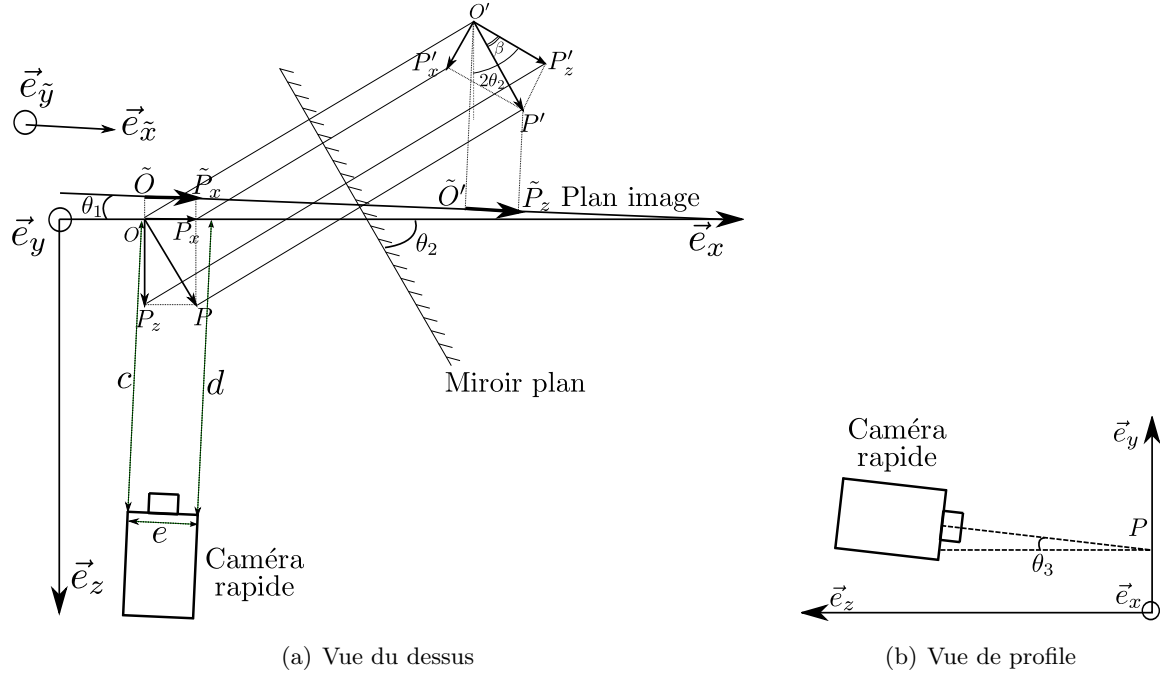


FIGURE C.1 – Schématisation du protocole de mesure.

- e : largeur de la caméra,
- $K_{x,y}^{px2m}$ et K_z^{px2m} : facteurs de conversion d'une position en pixel vers une position en mètre, respectivement pour les vues directes et dans le miroir, ils s'expriment en m/px.

D'autre part, sachant que le miroir utilisé est plan, on rappelle enfin les égalités $OP_x = O'P'_x$, et $OP_z = O'P'_z$.

C.1.2 Expression des déplacements

Lors de la mise en place du protocole expérimental, l'angle θ_3 défini figure C.1-b), est mis manuellement à zéro grâce à un niveau permettant de régler l'inclinaison de la caméra. Ainsi, et d'après les notations introduites précédemment, on exprime aisément les déplacements suivant les axes $\vec{e}_x$ et $\vec{e}_y$:

$$x(t) = \tilde{x} K_{x,y}^{px2m} \cos \theta_1, \quad (\text{C.1.1})$$

$$y(t) = \tilde{y} K_{x,y}^{px2m}. \quad (\text{C.1.2})$$

Afin d'exprimer $z(t)$, on écrit tout d'abord les relations trigonométriques

$$\begin{aligned} z(t) &= O'P' \cos \beta, \\ x(t) &= O'P' \sin \beta, \\ \tilde{O}'\tilde{P}_z &= O'P' \sin (2\theta_2 - \beta), \end{aligned}$$

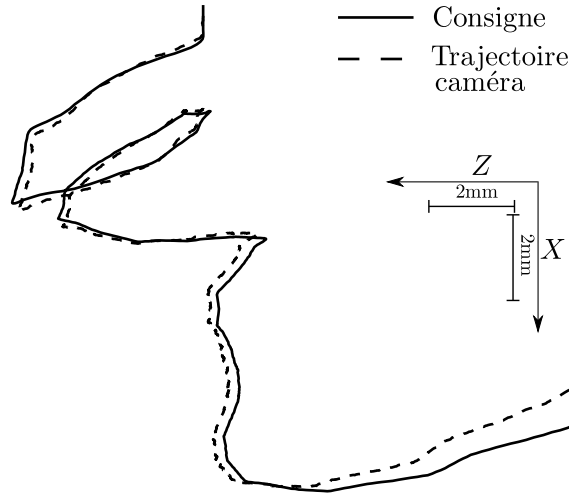


FIGURE C.2 – Trajectoire d’un pincement de corde effectuée par le doigt artificiel et son mouvement estimé par le biais d’une caméra rapide.

dont on déduit l’expression

$$\begin{aligned}
 z(t) &= \frac{\tilde{O}'\tilde{P}_z + OP_x \cos 2\theta_2}{\sin 2\theta_2}, \\
 &= \frac{\tilde{z}K_z^{px2m} + \tilde{x} \cos \theta_1 K_{x,y}^{px2m} \cos 2\theta_2}{\sin 2\theta_2},
 \end{aligned} \tag{C.1.3}$$

en fonction uniquement de paramètres mesurables.

Dans le but de confirmer le processus d’estimation de mouvement avec une caméra rapide, une série de trajectoires ainsi obtenues ont été confrontées à celle effectivement filmée. Pour ce faire, nous avons utilisé le doigt robotisé présenté au chapitre 7. Celui-ci étant asservi en déplacement, ses codeurs retournent la trajectoire que son extrémité a effectivement suivie. La figure C.2 présente les résultats obtenus pour une consigne donnée. La trajectoire extraite du film effectué à la caméra rapide correspond à celle de l’embout en silicone disposé sur le doigt robotisé. Elle correspond globalement bien au mouvement effectué par le bout du doigt, validant le processus d’estimation de trajectoire par la caméra rapide.

C.2 Incertitudes de mesures : expressions générales

C.2.1 Incertitudes-types sur les trajectoires

Au cours du processus d’estimation précédemment décrit, de multiples sources d’erreur sont susceptibles d’altérer les résultats, notamment, les caractéristiques géométriques du montage expérimental, ou encore l’algorithme de traitement d’image. C’est pourquoi, les mesurandes recherchés $X(t)$, $Y(t)$ et $Z(t)$ doivent s’exprimer à l’aide de leurs estimations $x(t)$, $y(t)$, et $z(t)$,

associées à leurs incertitudes-types $u_c(x)$, $u_c(y)$, $u_c(z)$:

$$\begin{aligned} X(t) &= x(t) \pm k u_c(x), \\ Y(t) &= y(t) \pm k u_c(y), \\ Z(t) &= z(t) \pm k u_c(z), \end{aligned}$$

où k est un entier choisi en fonction du niveau de confiance désiré. Il est ici pris égal à 2, induisant un niveau de confiance de 95% [Priel 1999; Courtier and Giacomo 2003; Désenfant et al. 2005].

Afin de déterminer les incertitudes-types u_c , la loi de propagation des incertitudes est appliquée [Priel 1999; Désenfant et al. 2005]. Pour un mesurande quelconque M dont l'estimation m dépend de N grandeurs d'entrée $g_{i=1\dots N}$, $m = f(g_1, g_2, \dots, g_N)$. La loi de propagation des incertitudes exprime l'incertitude-type [Le Carrou 2011] :

$$u_c(m) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial g_i} \right)^2 u^2(g_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial g_i} \frac{\partial f}{\partial g_j} \text{cov}(g_i, g_j)}.$$

Dans l'hypothèse où les grandeurs d'entrée $g_{i=1\dots N}$ ne sont pas corrélées, l'expression précédente se simplifie :

$$u_c(m) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial g_i} \right)^2 u^2(g_i)}. \quad (\text{C.2.4})$$

Appliquée au cas présent et en supposant les grandeurs d'entrée en jeu dans les équations C.1.1, C.1.2 et C.1.3 décorréées, la relation C.2.4 permet d'exprimer les incertitudes-types sur les estimations de $x(t)$, $y(t)$ et $z(t)$:

$$u_c(x)^2 = \left(\frac{\partial x(t)}{\partial \tilde{x}} \right)^2 u(\tilde{x})^2 + \left(\frac{\partial x(t)}{\partial K_{x,y}^{px2m}} \right)^2 u(K_{x,y}^{px2m})^2 + \left(\frac{\partial x(t)}{\partial \theta_1} \right)^2 u(\theta_1)^2, \quad (\text{C.2.5})$$

$$u_c(y)^2 = \left(\frac{\partial y(t)}{\partial \tilde{y}} \right)^2 u(\tilde{y})^2 + \left(\frac{\partial y(t)}{\partial K_{x,y}^{px2m}} \right)^2 u(K_{x,y}^{px2m})^2, \quad (\text{C.2.6})$$

$$\begin{aligned} u_c(z)^2 &= \left(\frac{\partial z(t)}{\partial \tilde{x}} \right)^2 u(\tilde{x})^2 + \left(\frac{\partial z(t)}{\partial K_{x,y}^{px2m}} \right)^2 u(K_{x,y}^{px2m})^2 + \left(\frac{\partial z(t)}{\partial \tilde{z}} \right)^2 u(\tilde{z})^2 \\ &+ \left(\frac{\partial z(t)}{\partial K_z^{px2m}} \right)^2 u(K_z^{px2m})^2 + \left(\frac{\partial z(t)}{\partial \theta_1} \right)^2 u(\theta_1)^2 + \left(\frac{\partial z(t)}{\partial \theta_2} \right)^2 u(\theta_2)^2. \end{aligned} \quad (\text{C.2.7})$$

Finalement, en utilisant les équations C.1.1, C.1.2, et C.1.3 les termes en dérivées partielles se développent de la manière suivante

$$\begin{aligned}
\frac{\partial x(t)}{\partial \tilde{x}} &= K_{x,y}^{px2m} \cos \theta_1, \\
\frac{\partial x(t)}{\partial K_{x,y}^{px2m}} &= \tilde{x} \cos \theta_1, \\
\frac{\partial x(t)}{\partial \theta_1} &= -\tilde{x} K_{x,y}^{px2m} \sin \theta_1, \\
\frac{\partial y(t)}{\partial \tilde{y}} &= K_{x,y}^{px2m}, \\
\frac{\partial y(t)}{\partial K_{x,y}^{px2m}} &= \tilde{y}, \\
\frac{\partial z(t)}{\partial \tilde{x}} &= \frac{K_{x,y}^{px2m} \cos \theta_1}{\tan(2\theta_2)}, \\
\frac{\partial z(t)}{\partial K_{x,y}^{px2m}} &= \frac{\tilde{x} \cos \theta_1}{\tan(2\theta_2)}, \\
\frac{\partial z(t)}{\partial \tilde{z}} &= \frac{K_z^{px2m} \cos \theta_1}{\sin(2\theta_2)}, \\
\frac{\partial z(t)}{\partial K_z^{px2m}} &= \frac{\tilde{z} \cos \theta_1}{\sin(2\theta_2)}, \\
\frac{\partial z(t)}{\partial \theta_1} &= -\frac{(\tilde{z} K_z^{px2m} + \tilde{x} K_{x,y}^{px2m} \cos(2\theta_2)) \sin \theta_1}{\sin(2\theta_2)}, \\
\text{et, } \frac{\partial z(t)}{\partial \theta_2} &= -2 \cos \theta_1 \left(\frac{\tilde{z} K_z^{px2m} \cos(2\theta_2)}{\sin^2 2\theta_2} + \frac{\tilde{x} K_{x,y}^{px2m} (1 + \tan^2(2\theta_2))}{\tan 2\theta_2} \right).
\end{aligned}$$

C.2.2 Incertitudes-types sur les grandeurs d'entrée

Afin d'estimer les incertitudes-types $u_c(x)$, $u_c(y)$, $u_c(z)$ dont les expressions sont données par les équations C.2.5, C.2.6 et C.2.7, les variables d'entrées $\tilde{x}$, $\tilde{y}$, $\tilde{z}$, θ_1 , θ_2 , $K_{x,y}^{px2m}$, K_z^{px2m} et les incertitudes-types qui leurs sont associées doivent être déterminées.

Grandeurs d'entrée indépendantes de la méthode de traitement d'image

Dans un premier temps, les grandeur d'entrée θ_1 , θ_2 , $K_{x,y}^{px2m}$, K_z^{px2m} , indépendantes du traitement d'image, sont étudiées. Elles sont déterminées par le biais de la mesure des paramètres géométriques c , d , et e préalablement définis, et de

- $\tilde{\Delta}_c^x$, l'écart entre deux cordes dans la vue directe,
- $\tilde{\Delta}_c^z$, l' écart entre deux cordes vue dans le miroir,
- $\tilde{D}_c^x$, le diamètre de la corde étudiée dans la vue directe,
- $\tilde{D}_c^z$, le diamètre de la corde étudiée vue dans le miroir, et
- D_c , le diamètre de la corde étudiée.

En s'appuyant sur la figure C.1-a), les grandeurs d'entrée s'expriment

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \arctan\left(\frac{c-d}{e}\right), \\ \theta_2 &= \frac{1}{2} \arccos\left(\frac{\tilde{\Delta}_c^z}{\tilde{\Delta}_c^x}\right), \\ K_x^{px2m} &= \frac{D_c}{\tilde{D}_c^x}, \\ K_z^{px2m} &= \frac{D_c}{\tilde{D}_c^z},\end{aligned}$$

dont les incertitudes-types associées s'écrivent, à partir de la loi de propagation présentée équation C.2.4

$$u_c(\theta_1)^2 = \left(\frac{\partial\theta_1}{\partial c}\right)^2 u(c)^2 + \left(\frac{\partial\theta_1}{\partial d}\right)^2 u(d)^2 + \left(\frac{\partial\theta_1}{\partial e}\right)^2 u(e)^2, \quad (\text{C.2.8})$$

$$u_c(\theta_2)^2 = \left(\frac{\partial\theta_2}{\partial\tilde{\Delta}_c^x}\right)^2 u(\tilde{\Delta}_c^x)^2 + \left(\frac{\partial\theta_2}{\partial\tilde{\Delta}_c^z}\right)^2 u(\tilde{\Delta}_c^z)^2, \quad (\text{C.2.9})$$

$$u_c(K_{x,y}^{px2m})^2 = \left(\frac{\partial K_{x,y}^{px2m}}{\partial\tilde{D}_c^x}\right)^2 u(\tilde{D}_c^x)^2 + \left(\frac{\partial K_{x,y}^{px2m}}{\partial D_c}\right)^2 u(D_c)^2, \quad (\text{C.2.10})$$

$$u_c(K_z^{px2m})^2 = \left(\frac{\partial K_z^{px2m}}{\partial\tilde{D}_c^z}\right)^2 u(\tilde{D}_c^z)^2 + \left(\frac{\partial K_z^{px2m}}{\partial D_c}\right)^2 u(D_c)^2, \quad (\text{C.2.11})$$

avec

$$\begin{aligned}\frac{\partial\theta_1}{\partial c} &= \frac{e}{(c-d)^2 + e^2}, \\ \frac{\partial\theta_1}{\partial d} &= \frac{-e}{(c-d)^2 + e^2}, \\ \frac{\partial\theta_1}{\partial e} &= -\frac{c-d}{(c-d)^2 + e^2},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial\theta_2}{\partial\tilde{\Delta}_c^x} &= \frac{1}{2} \frac{\tilde{\Delta}_c^z}{(\tilde{\Delta}_c^x)^2 \sqrt{1 - \left(\frac{\tilde{\Delta}_c^z}{\tilde{\Delta}_c^x}\right)^2}}, \\ \frac{\partial\theta_2}{\partial\tilde{\Delta}_c^z} &= \frac{-1}{2\tilde{\Delta}_c^x \sqrt{1 - \left(\frac{\tilde{\Delta}_c^z}{\tilde{\Delta}_c^x}\right)^2}},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial K_x^{px2m}}{\partial\tilde{D}_c^x} &= \frac{-D_c}{(\tilde{D}_c^x)^2}, \\ \frac{\partial K_x^{px2m}}{\partial D_c} &= \frac{1}{\tilde{D}_c^x}, \\ \frac{\partial K_z^{px2m}}{\partial\tilde{D}_c^z} &= \frac{-D_c}{(\tilde{D}_c^z)^2}, \\ \text{et, } \frac{\partial K_z^{px2m}}{\partial D_c} &= \frac{1}{\tilde{D}_c^z}.\end{aligned}$$

Ainsi, de l'estimation des paramètres c, d, e, Δ_c^z et Δ_c^x et de leurs incertitudes découleront les valeurs et incertitudes-types des grandeurs d'entrée $\theta_1, \theta_2, K_{x,y}^{px2m}$ et K_z^{px2m} .

Grandeurs d'entrée dépendantes de la méthode de traitement d'image

Les grandeurs d'entrée dépendantes de l'algorithme de traitement d'images sont les trajectoires en pixels $\tilde{x}, \tilde{y}$ et $\tilde{z}$. Leur estimation est faite par le biais de la combinaison d'un algorithme de block-matching avec une détection de contour actif. Cette méthode est explicitée Sec. 5 à l'aide de [El-Azim 2002; Chan and Vese 2001].

Les erreurs sur la détermination de ces trajectoires peuvent avoir diverses origines : la précision de l'algorithme implémenté, sa sensibilité au bruit dans l'image (ici lié à la qualité du contraste permettant de distinguer l'objet dans l'image), ainsi que l'influence de l'opérateur qui définit initialement la zone d'intérêt dans la première image. Ces incertitudes sont estimées par le biais des caractéristiques métrologiques de justesse¹ et de fidélité² de l'algorithme implémenté. Pour cela, un traitement statistique des données est mis en place (méthode de type A [Courtier and Giacomo 2003]). On rappelle les définitions suivantes pour un cas quelconque [Priel 1999] :

- mesurage i sur N de la variable R : R_i ,
- moyenne arithmétique : $\bar{R} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N R_j$,
- écart-type expérimental : $\sigma(R)^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})^2$,
- incertitude-type : $u(X) = \sigma(\bar{R}) = \frac{\sigma(R)}{\sqrt{N}}$.

Les erreurs systématiques liées à la notion de justesse d'une part et aléatoires liées à la notion de fidélité d'autre part s'expriment respectivement $|R_{\mathbb{R}} - \bar{R}|$ et $u(R)$ où $R_{\mathbb{R}}$ est la valeur vraie recherchée. Dans le cas présent, R correspond à la trajectoire estimée.

C.3 Incertitudes de mesures : estimations

C.3.1 Grandeurs d'entrée indépendantes de la méthode de traitement d'images

Au cours des treize séances de mesures effectuées relativement à l'étude de l'interaction entre le doigt et la corde de harpe présentée chapitre 5, le montage expérimental, et plus précisément la position de la caméra rapide et du miroir, a varié. En effet, entre deux séances, ceux-ci étaient démontés puis remontés. Les variables $c, d, \tilde{D}_c^z$ et $\tilde{\Delta}_c^z$ estimées à chaque séance de mesures sont reportées tableau C.1. Les paramètres $e, D_c, \tilde{\Delta}_c^x$ et $\tilde{D}_c^x$, sont quant à eux fixes. Ceci est évident pour les paramètres géométriques de la caméra et de la corde e et D_c et a été vérifié pour $\tilde{\Delta}_c^x$ et $\tilde{D}_c^x$ à chaque séance de mesure. Leurs estimations respectives sont également proposées tableau C.1. Ces mesures ont, dans tous les cas, été répétées cinq fois. Les incertitudes composées [Priel 1999; Désenfant et al. 2005], obtenues à partir des incertitudes de lecture [Priel 1999] et

1. « caractérise l'écart entre la moyenne d'un ensemble de résultats d'essais et la valeur de référence acceptée » [Priel 1999]

2. « définit l'aptitude d'une méthode à fournir des résultats d'essais très voisins les uns des autres, lorsqu'un même produit est essayé plusieurs fois dans des conditions données d'application de la méthode » [Priel 1999]

Harpiste	c (cm)	d (cm)	$\tilde{D}_c^z$ (px)	$\tilde{\Delta}_c^z$ (px)	$\tilde{D}_c^x$ (px)	$\tilde{\Delta}_c^x$ (px)	D_c (mm)	e (cm)
H_1	65.5	65.7	14	106.3				
H_2	64	64.7	17	109.3				
H_3	65.5	65.7	14	106.3				
H_4	64.8	65.4	17	98				
H_5	53.5	54	23	99.75				
H_6	64.9	65.6	16	124				
H_7	65.5	65.7	17	109.3	18	144	2.0	10
H_8	64	64.7	19	96.5				
H_8	47.2	47.9	17	94.25				
H_8	47.4	47.9	17	89.25				
H_8	64.8	65.4	17	96				
H_9	53.5	54	22	101				
H_{10}	65.4	65.6	16	97.3				

TABLE C.1 – Mesures des grandeurs d’entrée dans le cadre des différents montages expérimentaux mis en place.

de répétabilité de l’opérateur, sont calculées à partir de la relation

$$u_c = \sqrt{\sum_i u_i^2}, \quad (\text{C.3.12})$$

et finalement répertoriées tableau C.2 pour l’ensemble de ces paramètres.

Finalement, les évaluations et incertitudes des grandeurs d’entrée associées à chaque montage peuvent être calculées à partir des relations C.2.8, C.2.9, C.2.10 et C.2.11. Les résultats sont répertoriés tableau C.3.

	Grandeur d’entrée	Incertitude de lecture	Incertitude de répétabilité	Incertitude composée
$H_{1..10}$	c (m)	$\frac{10^{-2}}{2\sqrt{3}}$	$0.2 \cdot 10^{-2}$	$3.5 \cdot 10^{-3}$
$H_{1..10}$	d (m)	$\frac{10^{-2}}{2\sqrt{3}}$	$0.2 \cdot 10^{-2}$	$3.5 \cdot 10^{-3}$
$H_{1..10}$	e (m)	$\frac{10^{-2}}{2\sqrt{3}}$	$0.05 \cdot 10^{-2}$	$0.29 \cdot 10^{-2}$
$H_{1..10}$	$\tilde{\Delta}_c^x$ (px)	$\frac{1}{2\sqrt{3}}$	0.2	0.35
$H_{1..10}$	$\tilde{D}_c^z$ (px)	$\frac{1}{2\sqrt{3}}$	0.2	0.35
$H_{1..10}$	$\tilde{D}_c^x$ (px)	$\frac{1}{2\sqrt{3}}$	0.2	0.35
$H_{1..10}$	D_c (m)	$\frac{10^{-4}}{2\sqrt{3}}$	$1.4 \cdot 10^{-4}$	$1.4 \cdot 10^{-4}$
$H_{1..10}$	$\tilde{\Delta}_c^z$ (px)	$\frac{1}{2\sqrt{3}}$	0.2	0.44

TABLE C.2 – Estimation des incertitudes de mesure sur les grandeurs du montage.

	θ_1 (rad)		θ_2 (rad)		$K_{x,y}^{px2m}$ ($\times 10^{-4}$ m.px $^{-1}$)		K_z^{px2m} ($\times 10^{-4}$ m.px $^{-1}$)	
	Estim	u^2	Estim	u^2	Estim	u^2	Estim	u^2
H_1	-2.10^{-2}	$2.4.10^{-3}$	0.37	$5.2.10^{-3}$	1.3	$2.7.10^{-6}$	1.4	$3.1.10^{-6}$
H_2	$-7.0.10^{-2}$	$2.4.10^{-3}$	0.35	$3.2.10^{-3}$	1.3	$2.3.10^{-6}$	1.2	$2.1.10^{-6}$
H_3	-2.10^{-2}	$2.4.10^{-3}$	0.37	$5.2.10^{-3}$	1.3	$2.3.10^{-6}$	1.4	$3.1.10^{-6}$
H_4	$-6.0.10^{-2}$	$2.4.10^{-3}$	0.41	$2.1.10^{-4}$	1.3	$2.3.10^{-6}$	1.2	$2.1.10^{-6}$
H_5	-5.10^{-2}	$2.4.10^{-3}$	0.40	$6.3.10^{-4}$	0.80	$0.93.10^{-6}$	0.87	$1.1.10^{-6}$
H_6	$-7.0.10^{-2}$	$2.4.10^{-3}$	0.27	$1.5.10^{-2}$	1.2	$2.1.10^{-6}$	1.3	$2.3.10^{-6}$
H_7	$-8.0.10^{-2}$	$2.4.10^{-3}$	0.35	$3.2.10^{-3}$	1.3	$2.3.10^{-6}$	1.2	$2.1.10^{-6}$
H_8	$-7.0.10^{-2}$	$2.4.10^{-3}$	0.42	$6.4.10^{-4}$	1.0	$1.6.10^{-6}$	1.1	$1.6.10^{-6}$
H_8	$-7.0.10^{-2}$	$2.4.10^{-3}$	0.43	$3.4.10^{-4}$	1.3	$2.3.10^{-6}$	1.2	$2.1.10^{-6}$
H_8	-5.10^{-2}	$2.4.10^{-3}$	0.45	$5.9.10^{-5}$	1.3	$2.3.10^{-6}$	1.2	$2.1.10^{-6}$
H_8	$-6.0.10^{-2}$	$2.4.10^{-3}$	0.42	$2.3.10^{-4}$	1.3	$2.3.10^{-6}$	1.2	$2.1.10^{-6}$
H_9	-5.10^{-2}	$2.4.10^{-3}$	0.40	$6.5.10^{-4}$	0.87	$1.1.10^{-6}$	0.91	$1.2.10^{-6}$
H_{10}	-2.10^{-2}	$2.4.10^{-3}$	0.41	$2.2.10^{-5}$	1.2	$2.1.10^{-6}$	1.3	$2.3.10^{-6}$

TABLE C.3 – Estimations des grandeurs d'entrée et de leurs incertitudes lors des différents montages.

C.3.2 Grandeurs d'entrée dépendantes de la méthode de traitement d'image

Afin d'estimer les caractéristiques métrologiques associées à l'algorithme implémenté, plusieurs séquences d'images de mêmes propriétés que celles issues de la mesure ont été synthétisées. Les paramètres sont les suivants

- Format d'enregistrement : bmp,
- Taille des images : 480×600 pixels,
- Profondeur de bit : 8,
- Resolution : $86,9690 \times 86,9690$ px/mm.

Chaque séquence d'images comporte deux zones noires, l'une circulaire, l'autre rectangulaire, de dimensions avoisinant celles des marqueurs réels disposés sur le doigt et la corde lors des mesures présentées chapitre 5. Au cours de ces séquences, les marqueurs sont animés de mouvements typiques de ceux estimés du doigt et de la corde, avec une vitesse évoluant également de manière réaliste. D'une séquence à l'autre, le niveau de bruit artificiellement ajouté varie. Il s'agit d'un bruit blanc, de moyenne nulle, de variance comprise entre 0 et 0.27, soit une valeur minimale du PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) de 9.4dB. Deux illustrations de ces images synthétisées sont proposées figure C.3, représentant les cas où le PSNR sont le plus élevé et le plus bas. Remarquons que le PSNR permet d'estimer la distorsion dans une image par rapport à une image de référence. Les incertitudes-types ainsi estimées sont présentées tableau C.4. Elles sont calculées avec un intervalle de confiance de 95% au long du déroulement de la trajectoire. Le fait de considérer l'ensemble de la trajectoire permet ainsi d'inclure l'erreur liée à la vitesse de l'objet. Les résultats indiquent que cette dernière est négligeable. En effet, l'erreur maximale

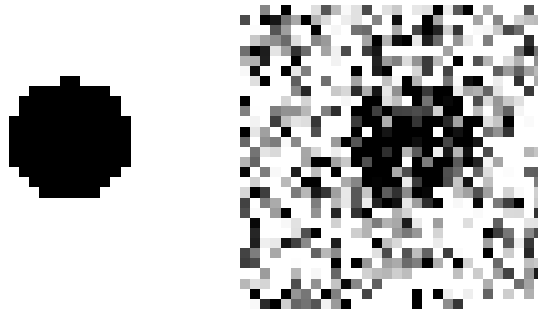


FIGURE C.3 – Exemples d’images synthétisées avec un faible ($PSNR \mapsto \infty$) et un fort ($PSNR \mapsto 9.4dB$) niveau de bruit.

PSNR (dB)	Incertitude systématique (px)	Incertitude aléatoire (px)	Incertitude composée (px)
∞	0.049	0	0.049
17	0.052	0	0.052
13	0.082	0	0.082
11	0.12	7.10^{-5}	0.12
9.4	0.20	0.0012	0.2

TABLE C.4 – Estimation de l’incertitude engendrée par l’algorithme de tracking

induite est de l’ordre de 0.001%. D’autre part, l’algorithme implémenté reste robuste pour des images d’assez mauvais rapport signal à bruit. De plus, en pratique, les séries d’images mesurées sont l’objet d’un pré-traitement avant que l’extraction de trajectoire ne soit effectuée. Ainsi, le bruit dans l’image est minimisé, et on estime que pour un PSNR moyen d’environ 20dB, l’incertitude finale sur le code de suivi de trajectoire est de 0.05px.

C.3.3 Bilan

L’erreur commise au cours de l’évaluation de la trajectoire, prenant en compte l’ensemble des sources d’erreur liées à la fois à la géométrie du montage expérimental, mais aussi à l’algorithme de post-traitement utilisé afin d’extraire la trajectoire de l’objet étudié, peut finalement être estimée grâce aux équations C.2.5, C.2.6 et C.2.7 et à l’estimation des grandeurs en jeu. Il apparaît que cette erreur est dépendante des variables $\tilde{x}$, $\tilde{y}$ et $\tilde{z}$, i.e. de l’amplitude de déplacement de l’objet. Dans le but de déterminer l’erreur maximale potentiellement commise lors de la détection de trajectoire, les amplitudes maximales de déplacement suivant chaque direction doivent être estimées. D’après l’étude menée au chapitre 5, la valeur maximale de déplacement de la corde par rapport à sa position au repos est d’environ 8mm. Nous choisissons de majorer cette valeur par 1cm. Ainsi, compte tenu de l’angle de polarisation initial de la corde potentiellement variable entre 20° et 45° d’après ce même chapitre, les déplacements de la corde suivant les directions x et z sont majorés à 9mm. Concernant la direction verticale y, une valeur de 1mm est choisie. Les pourcentages d’erreur sont finalement calculés pour ces déplacements maximaux, et

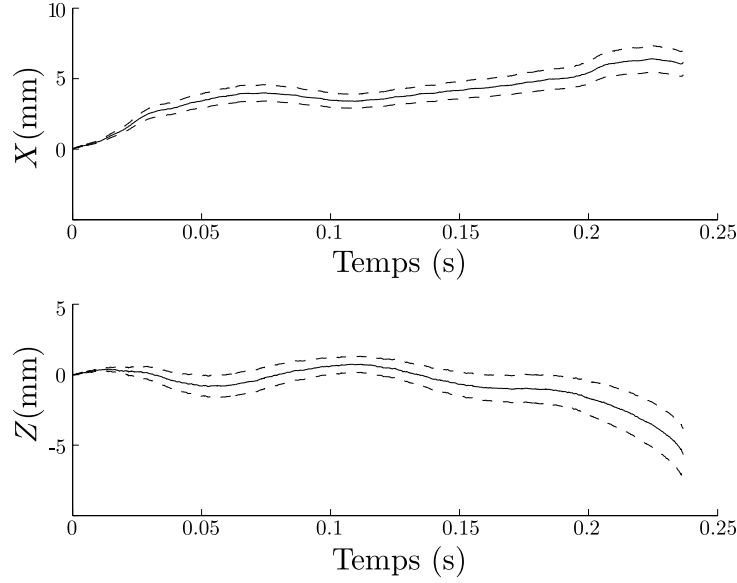


FIGURE C.4 – Trajectoires estimées du doigt pendant un pincement de corde, suivant les axes $\vec{e}_x$ et $\vec{e}_z$. L'incertitude autour de la valeur estimée est présentée en pointillés et est calculée avec un taux de confiance à 95%.

ce pour chacun des treize montages expérimentaux effectués. On obtient

$$\begin{aligned} \left. \frac{u(x)}{x} \right|_{max} &= 7.133 \pm 0.002\%, \\ \left. \frac{u(y)}{y} \right|_{max} &= \left. \frac{u(x)}{x} \right|_{max}, \\ \left. \frac{u(z)}{z} \right|_{max} &= 17 \pm 2\%. \end{aligned}$$

On remarque tout d'abord que les pourcentages d'erreur obtenus sont logiquement plus faibles suivant l'axe $\vec{e}_x$ que l'axe $\vec{e}_z$. Ces variations sont la conséquence du nombre de paramètres en jeu dans l'expression de chacun de ces déplacements. D'autre part, sur l'ensemble des montages expérimentaux effectués, l'incertitude finalement obtenue varie faiblement suivant l'axe $\vec{e}_x$ et de manière plus importante suivant $\vec{e}_z$. Ceci est lié au fait que le miroir, n'influant que sur les déplacements suivant $\vec{e}_z$, ait été repositionné à chaque montage.

C.4 Application

Finalement, la figure C.4 propose un exemple de trajectoire obtenue associée à son incertitude suivant les deux axes d'études, $\vec{e}_x$ et $\vec{e}_z$. L'incertitude est ici représentée avec un taux de confiance à 95%. Le déplacement X met en évidence la dépendance des incertitudes en l'amplitude du déplacement. En effet, l'incertitude croît avec le déplacement. Outre cette remarque, l'incertitude en Z indique également sa dépendance en la trajectoire X. Cependant, les incertitudes estimées sont raisonnables comparées aux déplacements mesurés : les erreurs maximales sur X et Z sont respectivement de 0.9mm et de 1.8mm, soit 7% et 16% du déplacement maximal.

Annexe D

Rotation initiale de la corde

Nous avons mis en évidence au cours du chapitre 5 que, lors du pincement, le harpiste applique une rotation à la corde autour de son axe. Cette rotation peut atteindre des valeurs jusqu'à 80° à l'instant où la corde est relâchée. Cette composante est très certainement utile au harpiste dans son contrôle du pincement. Cependant, si tant est que l'impact de la position et de la vitesse de la corde à l'instant de son lâcher sur les oscillations libres de la corde est bien connu, celui de la rotation initiale de celle-ci ne l'est pas. Nous cherchons donc dans cette annexe à mettre en évidence de manière théorique l'influence de la composante de torsion initiale de la corde sur sa vibration.

D.1 Mise en équations

La figure D.1 présente la schématisation du problème étudié. Soit une corde fixée à ses deux extrémités, pincée ponctuellement en son abscisse y_0 , initialement au repos, supposée souple et d'allongement uniforme, on note sa longueur L , sa section A , sa masse linéique ρ_l , sa tension T et son moment quadratique d'inertie I . Rappelons que dans le cas présent considérant une corde parfaitement cylindrique, ce dernier vaut $\pi d^4/64$ où d est le diamètre de la corde. Les amortissements, célérités et pulsations propres des ondes transverses et de torsion parcourant cette corde sont notés respectivement R_T , c_T , ω^T et R_θ , c_θ , ω^θ . A l'instant du lâcher, la position et la vitesse du point de pincement de la corde s'expriment respectivement $\vec{r}_0 = x_0\vec{e}_x + z_0\vec{e}_z$ et $\dot{\vec{r}}_0 = \dot{x}_0\vec{e}_x + \dot{z}_0\vec{e}_z$. La rotation de cet élément de corde autour de l'axe principal de celle-ci, par rapport à sa position au repos est θ_0 , et sa vitesse angulaire est $\dot{\theta}_0$.

Sous l'hypothèse de « rotations modérées », les déplacements transverses de la corde sont régis par le système équations suivant [Watsky 1992]

$$\begin{cases} \ddot{x}(t) + 2R_T\dot{x}(t) - c_T^2 x''(t) - \frac{I}{A}c_L^2(\theta' z'')' = 0; \\ \ddot{z}(t) + 2R_T\dot{z}(t) - c_T^2 z''(t) + \frac{I}{A}c_L^2(\theta' x'')' = 0; \end{cases} \quad (\text{D.1.1})$$

Son comportement en torsion est quant à lui décrit par l'équation

$$\ddot{\theta}(t) + 2R_\theta\dot{\theta}(t) - c_\theta^2\theta''(t) = 0. \quad (\text{D.1.2})$$

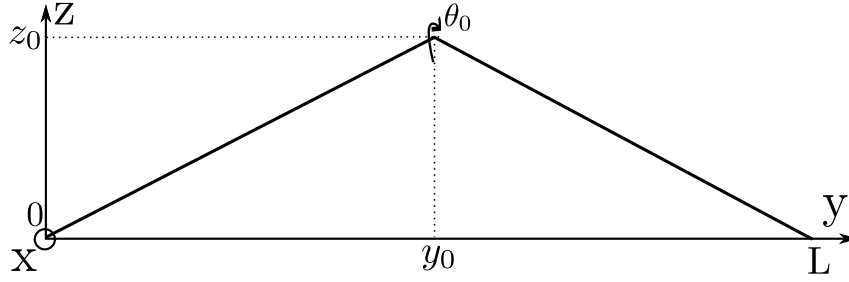


FIGURE D.1 – Schématisation de la corde pincée étudiée et notations associée.

La forme des solutions de ces équations est obtenue à partir des conditions aux extrémités de la corde, ici supposées fixes. En effet, en cherchant des solutions à variables séparées, on obtient classiquement

$$x(y, t) = \sum_{n=1}^N x_n(t) \sin(k_n y), \quad (\text{D.1.3})$$

$$z(y, t) = \sum_{n=1}^N z_n(t) \sin(k_n y), \quad (\text{D.1.4})$$

$$\theta(y, t) = \sum_{n=1}^{N_\theta} \theta_n(t) \sin(k_n^\theta y), \quad (\text{D.1.5})$$

où N et N_θ sont les nombre de modes de vibration considérés, et où $k_n = \frac{\omega_n^T}{c_T}$ et $k_n^\theta = \frac{\omega_n^\theta}{c_\theta}$ sont les vecteurs d'ondes. Remarquons que les vibrations transverses suivant les deux directions ont le même vecteur d'onde du fait des conditions aux extrémités supposées fixes. On pose $\Phi_n^T = \sin(k_n y)$ et $\Phi_n^\theta = \sin(k_n^\theta y)$, les déformées modales. La détermination des parties temporelles $x_n(t)$, $z_n(t)$ et $\theta_n(t)$ des solutions est plus complexe. On emploie pour cela la procédure de Galerkin explicitée par exemple dans [Ciarlet 2002]. Cette dernière consiste à injecter les solutions D.1.3, D.1.4 et D.1.5 dans les équations du mouvement D.1.1 et D.1.2. En utilisant ensuite la propriété d'orthogonalité des modes et en intégrant le résultat obtenu sur la longueur de la corde, on obtient [Watsky 1992]

$$\begin{cases} \ddot{x}_n(t) + 2R_T \dot{x}_n(t) + c_T^2 k_n^2 x_n(t) = -\frac{I}{A} c_L^2 \frac{\pi}{4} \sum_q \sum_k q k^2 \theta_q z_k \left[\frac{n(k-q)}{n^2 - (k-q)^2} + \frac{n(k+q)}{n^2 - (k+q)^2} \right], \\ \ddot{z}_n(t) + 2R_T \dot{z}_n(t) + c_T^2 k_n^2 z_n(t) = \frac{I}{A} c_L^2 \frac{\pi}{4} \sum_q \sum_k q k^2 \theta_q x_k \left[\frac{n(k-q)}{n^2 - (k-q)^2} + \frac{n(k+q)}{n^2 - (k+q)^2} \right], \end{cases} \quad (\text{D.1.6})$$

et,

$$\ddot{\theta}_n(t) + 2R_\theta \dot{\theta}_n(t) + (c_\theta k_n^\theta)^2 \theta(t) = 0. \quad (\text{D.1.7})$$

La résolution de ces trois équations donnera ainsi accès aux composantes temporelles $x_n(t)$, $z_n(t)$ et $\theta_n(t)$ encore manquantes des solutions recherchées des équations D.1.3, D.1.4 et D.1.5.

D.2 Résolution de l'équation de torsion

Comme l'équation de torsion D.1.2 n'est pas couplée aux équations gouvernant les mouvements transverses de la corde, la résolution de l'équation D.1.7 s'effectue de manière classique [Morse 1948; Valette 1995; Chaigne and Kergomard 2008] :

$$\theta(t) = e^{-R_\theta t} \left[A_n^\theta \cos(\Omega_n^\theta t + \Psi_n^\theta) + \frac{R_\theta A_n^\theta + B_n^\theta}{\Omega_n^\theta} \sin(\Omega_n^\theta t + \Psi_n^\theta) \right]$$

avec

$$\Omega_n^\theta = \omega_n^\theta \sqrt{1 - (R_\theta/\omega_n^\theta)^2}.$$

Comme dans la plupart des cas [Chaigne and Kergomard 2008], on fait l'hypothèse $\Omega_n^\theta \simeq \omega_n^\theta$, donnant

$$\theta(t) = e^{-R_\theta t} \left[A_n^\theta \cos(\omega_n^\theta t + \Psi_n^\theta) + \frac{R_\theta A_n^\theta + B_n^\theta}{\omega_n^\theta} \sin(\omega_n^\theta t + \Psi_n^\theta) \right] \quad (\text{D.2.8})$$

où $\Psi_n^\theta = \arctan(R_\theta/\omega_n^\theta)$ et les A_n^θ et B_n^θ sont les amplitudes modales exprimées ci-dessous :

$$\begin{aligned} A_n^\theta &= \langle \theta(y, 0), \Phi_n^\theta \rangle \\ &= \frac{2}{L} \int_0^L \theta(y, 0) \sin(k_n^\theta y) dy, \\ &= \frac{2\theta_0 L^2 \sin(k_n^\theta y_0)}{(n\pi)^2 y_0 (L - y_0)}, \end{aligned} \quad (\text{D.2.9})$$

et

$$\begin{aligned} B_n^\theta &= \langle \dot{\theta}(y, 0), \Phi_n^\theta \rangle \\ &= \frac{2}{\omega_n^\theta L} \int_0^L \dot{\theta}(y, 0) \sin(k_n^\theta y) dy, \\ &= \frac{2\dot{\theta}_0 L^3 \sin(k_n^\theta y_0)}{(n\pi)^3 c y_0 (L - y_0)}. \end{aligned} \quad (\text{D.2.10})$$

D.3 Résolution des équations de vibrations transverses

Les vibrations transverses de la cordes sont gouvernées par le système d'équations D.1.6. Il s'agit d'équations différentielles du second ordre à coefficients constants. La solution est donc la somme de leurs solutions particulières x^p et z^p et de l'équation homogène x^{essm} et z^{essm} .

D.3.1 Détermination de la solution de l'équation homogène

Forme générale

De la même manière que pour l'équation de torsion, la solution de l'équation homogène est

$$\begin{cases} x_n^{essm}(y, t) = e^{-R_T t} \left[C_n \cos \omega_n^T t + \frac{R_T C_n + D_n}{\omega_n^T} \sin \omega_n^T t \right], \\ z_n^{essm}(y, t) = e^{-R_T t} \left[E_n \cos \omega_n^T t + \frac{R_T E_n + F_n}{\omega_n^T} \sin \omega_n^T t \right]. \end{cases} \quad (\text{D.3.11})$$

En notant les amplitudes modales des vibrations transverses de la corde A_n^{Tx} , A_n^{Tz} , B_n^{Tx} et B_n^{Tz} , celles-ci s'expriment

$$\begin{cases} A_n^{Tx} = \langle x(y, 0), \Phi_n^T \rangle = \frac{2x_0 L^2 \sin k_n y_0}{(n\pi)^2 y_0 (L - y_0)}, \\ B_n^{Tx} = \langle \dot{x}(y, 0), \Phi_n^T \rangle = \frac{2\dot{x}_0 L^3 \sin k_n y_0}{(n\pi)^3 c y_0 (L - y_0)}, \\ A_n^{Tz} = \langle z(y, 0), \Phi_n^T \rangle = \frac{2z_0 L^2 \sin k_n y_0}{(n\pi)^2 y_0 (L - y_0)}, \\ B_n^{Tz} = \langle \dot{z}(y, 0), \Phi_n^T \rangle = \frac{2\dot{z}_0 L^3 \sin k_n y_0}{(n\pi)^3 c y_0 (L - y_0)}, \end{cases} \quad (\text{D.3.12})$$

ou encore

$$\begin{cases} A_n^{Tx} = C_n + x_n^p(t=0), \\ B_n^{Tx} = D_n + \dot{x}_n^p(t=0), \\ A_n^{Tz} = E_n + z_n^p(t=0), \\ B_n^{Tz} = F_n + \dot{z}_n^p(t=0). \end{cases} \quad (\text{D.3.13})$$

Ainsi, la connaissance des solutions particulières des équations D.1.6 à l'instant initial sont nécessaires à la détermination des coefficients modaux C_n , D_n , E_n et F_n , soit de la solution de l'équation sans second membre.

Expression de la solution particulière

Les solutions particulières des l'équations D.1.6 notées $x_n^p(t)$ et $z_n^p(t)$ sont recherchées sous la forme d'une exponentielle décroissante de coefficient d'amortissement $R_T + R_\theta$. En posant

$$\begin{aligned} f_{n,q,k} &= \frac{qk^2 n(k-q)}{n^2 - (k-q)^2} + \frac{qk^2 n(k+q)}{n^2 - (k+q)^2}, \\ K &= \frac{I}{A} c_L^2 \frac{\pi}{4}, \\ H_n &= \left((R_T + R_\theta)^2 - 2R_T(R_T + R_\theta) + c_T^2 k_n^2 \right)^{-1}, \end{aligned}$$

et en injectant les solutions $x_n(t) = x_n^{essm}(t) + x_n^p(t)$ et $z_n(t) = z_n^{essm}(t) + z_n^p(t)$ dans le système d'équations D.1.6, on obtient

$$\begin{cases} x_n^p(t) = -KH \sum_q \sum_k \theta_q(t) f_{n,q,k} (z_k^{essm}(t) + z_k^p(t)), \\ z_n^p(t) = KH \sum_q \sum_k \theta_q(t) f_{n,q,k} (x_k^{essm}(t) + x_k^p(t)). \end{cases} \quad (\text{D.3.14})$$

Il vient alors $x_n^p(t)$, $z_n^p(t)$ et leurs dérivées temporelles à l'instant initial des oscillations

$$\begin{cases} x_n^p(t=0) = -KH \sum_q \sum_k f_{n,q,k} A_q^\theta A_k^{Tx}, \\ z_n^p(t=0) = KH \sum_q \sum_k f_{n,q,k} A_q^\theta A_k^{Tz}, \\ \dot{x}_n^p(t=0) = -KH \left(\sum_q \sum_k f_{n,q,k} B_q^\theta A_k^{Tx} + \sum_q \sum_k f_{n,q,k} A_q^\theta B_k^{Tx} \right), \\ \dot{z}_n^p(t=0) = KH \left(\sum_q \sum_k f_{n,q,k} B_q^\theta A_k^{Tz} + \sum_q \sum_k f_{n,q,k} A_q^\theta B_k^{Tz} \right). \end{cases}$$

Finalement, d'après le système D.3.13 on exprime

$$\begin{cases} C_n = A_n^{T_x} + KH \sum_q \sum_k f_{n,q,k} A_q^\theta A_k^{T_z}, \\ D_n = B_n^{T_x} + KH \sum_q \sum_k f_{n,q,k} (B_q^\theta A_k^{T_z} + A_q^\theta B_k^{T_z}), \\ E_n = A_n^{T_z} - KH \sum_q \sum_k f_{n,q,k} A_q^\theta A_k^{T_x}, \\ F_n = B_n^{T_z} - KH \sum_q \sum_k f_{n,q,k} (B_q^\theta A_k^{T_x} + A_q^\theta B_k^{T_x}). \end{cases} \quad (\text{D.3.15})$$

De cette manière, les solutions $x_n^{essm}(y, t)$ et $z_n^{essm}(y, t)$ des équations homogènes du système D.1.6 peuvent être obtenues.

D.3.2 Détermination des solutions particulières des équations de vibrations transverses

La dernière étape consiste désormais à chercher l'expression des solutions particulières $x_n^p(t)$ et $z_n^p(t)$ du système D.1.6 à chaque instant. On a déjà vu à la section précédente que $x_n^p(t)$ et $z_n^p(t)$ pouvaient s'exprimer selon les équations D.3.14. A partir de ces relations, on écrit

$$x_n^p(t) = -KH \sum_q \sum_k \theta_q(t) f_{n,q,k} \left(z_k^{essm}(t) + KH \sum_r \sum_s \theta_r(t) f_{k,r,s} (x_s^{essm}(t) + x_s^p(t)) \right).$$

que l'on peut ré-écrire

$$\begin{aligned} & x_n^p(t) + \sum_s x_s^p(t) \left((KH)^2 \sum_q \sum_k \theta_q(t) f_{n,q,k} \sum_r \theta_r(t) f_{k,r,s} \right) \\ &= -KH \sum_q \sum_k \theta_q(t) f_{n,q,k} \left(z_k^{essm}(t) + KH \sum_r \sum_s \theta_r(t) f_{k,r,s} x_s^{essm}(t) \right). \end{aligned}$$

En posant

$$\sigma_{n,s}(t) = (KH)^2 \sum_q \sum_k \theta_q(t) f_{n,q,k} \sum_r \theta_r(t) f_{k,r,s}, \quad (\text{D.3.16})$$

on trouve

$$[\sigma_{n,1}(t); \sigma_{n,2}(t); \dots, (1 + \sigma_{n,s=n}(t)), \dots; \sigma_{n,N}(t)] \begin{bmatrix} x_1^p(t) \\ x_2^p(t) \\ \vdots \\ x_{s=n}^p(t) \\ \vdots \\ x_N^p(t) \end{bmatrix} \quad (\text{D.3.17})$$

$$= -KH \sum_q \sum_k \theta_q(t) f_{n,q,k} (z_k^{essm}(t) + KH \sum_r \sum_s \theta_r(t) f_{k,r,s} x_s^{essm}(t)) \triangleq H_n^y(t).$$

Et, en procédant de manière analogue,

$$[\sigma_{n,1}(t); \sigma_{n,2}(t); \dots, (1 + \sigma_{n,s=n}(t)), \dots; \sigma_{n,N}(t)] \begin{bmatrix} z_1^p(t) \\ z_2^p(t) \\ \vdots \\ z_{s=n}^p(t) \\ \vdots \\ z_N^p(t) \end{bmatrix} \quad (\text{D.3.18})$$

$$= KH \sum_q \sum_k \theta_q(t) f_{n,q,k} (y_k^{essm}(t) - KH \sum_r \sum_s \theta_r(t) f_{k,r,s} z_s^{essm}(t)) \triangleq H_n^z(t).$$

On évalue finalement les solutions particulières x_n^p et z_n^p par le biais des systèmes matriciels

$$\begin{bmatrix} x_1^p(t) \\ x_2^p(t) \\ \vdots \\ x_N^p(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \sigma_{1,1}(t) & \sigma_{1,2}(t) & \dots & \sigma_{1,N}(t) \\ \sigma_{2,1}(t) & 1 + \sigma_{2,2}(t) & \dots & \sigma_{2,N}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{N,1}(t) & \dots & \dots & 1 + \sigma_{N,N}(t) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} H_1^x(t) \\ H_2^x(t) \\ \vdots \\ H_N^x(t) \end{bmatrix},$$

et

$$\begin{bmatrix} z_1^p(t) \\ z_2^p(t) \\ \vdots \\ z_N^p(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \sigma_{1,1}(t) & \sigma_{1,2}(t) & \dots & \sigma_{1,N}(t) \\ \sigma_{2,1}(t) & 1 + \sigma_{2,2}(t) & \dots & \sigma_{2,N}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{N,1}(t) & \dots & \dots & 1 + \sigma_{N,N}(t) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} H_1^z(t) \\ H_2^z(t) \\ \vdots \\ H_N^z(t) \end{bmatrix}.$$

D.3.3 Bilan

Finalement, la résolution complète des équations de vibrations transverses de la corde fournit les solutions suivantes

$$x_n(t) = e^{-R_T t} \left[C_n \cos \omega_n^T t + \frac{R_T C_n + D_n}{\omega_n^T} \sin \omega_n^T t \right] \quad (\text{D.3.19})$$

$$+ (\sigma_{n,1} H_1^x(t) + \dots + \sigma_{n,n} H_n^x(t) + \dots + \sigma_{n,N} H_N^x(t)),$$

$$z_n(t) = e^{-R_T t} \left[E_n \cos \omega_n^T t + \frac{R_T E_n + F_n}{\omega_n^T} \sin \omega_n^T t \right] \quad (\text{D.3.20})$$

$$+ (\sigma_{n,1} H_1^z(t) + \dots + \sigma_{n,n} H_n^z(t) + \dots + \sigma_{n,N} H_N^z(t)).$$

où les coefficients C_n , D_n , E_n et F_n , σ , H_n^x et H_n^z sont définis respectivement équations D.3.15, D.3.16, D.3.17 et D.3.18.

En pratique, le calcul des $x_n(t)$ et $z_n(t)$ se déroule dans le même ordre que celui proposé lors de la résolution. Les coefficients $A_n^{T_x}$, $A_n^{T_z}$, $B_n^{T_x}$, et $B_n^{T_z}$ ainsi que $y_n^p(t=0)$ et $z_n^p(t=0)$ sont tout d'abord calculés afin d'obtenir les coefficients C_n , D_n , E_n et F_n . Ceux-ci permettent d'accéder à la solution sans second membre. Enfin, les solutions particulières sont calculées à chaque instant de la vibration.

Paramètre	Corde A	Corde B	Corde C
Numéro	00	30	45
Matériau	Nylon	Boyau	Acier
Longueur (m)	0.077	0.975	1.54
Diamètre (mm)	0.5	1.96	2.96
Fréquence (Hz)/Note	2960 / Sol ^{b6}	138.6 / Ré ^{b1}	30.9 / Do ^{b-1}
Tension (N)	45	215	486
Masse volumique (kg/m ³)	1100	1180	7800

TABLE D.1 – Caractéristiques des cordes utilisées pour estimer l’impact de sa rotation initiale sur ses oscillations. D’après [Le Carrou 2006].

D.4 Influence de la rotation sur les oscillations libres de la corde

D.4.1 Méthode

Afin de déterminer l’influence de la rotation initiale appliquée par le musicien sur la corde au cours du pincement, un descripteur spectral est calculé à partir des déplacements transverses de la corde. Ceux-ci sont obtenus suivant la méthode proposée précédemment. La harpe comportant de nombreuses cordes de caractéristiques différentes, nous étudions ici l’impact de la rotation sur trois d’entre elles. Le tableau D.1 référence leurs caractéristiques. Nous choisissons ici de calculer le centre de gravité spectral associé à diverses configurations de conditions initiales en déplacement, vitesse et rotation. Ce descripteur présente l’intérêt d’être relié à des attributs perceptifs du fait de sa relation avec la *brillance* du son, établie par [Grey and Gordon 1978]. Il est calculé comme suit

$$CGS = \frac{\sum_{n=1} n f_0 (A_n^2 + B_n^2)}{\sum_n (A_n^2 + B_n^2)},$$

avec, $A_n = C_n + y_n^p(t=0)$,
et $B_n = D_n + \dot{y}_n^p(t=0)$,

où les exposants signifiant l’assignation d’un élément aux vibrations transverses suivant l’axe x ou z sont supprimés. En effet, comme dans le cas présent les deux polarisations sont supposées avoir le même coefficient d’amortissement, l’étude d’une seule composante est ici suffisante.

Nous avons pu voir au chapitre 5 que les valeurs de déplacement, vitesse et rotation que le harpiste apporte à la corde varient fortement entre instrumentistes, mais aussi entre techniques de jeu. Nous considérons donc ici, pour chaque paramètres (déplacement, vitesse et rotation) trois valeurs possibles : minimale, maximale et médiane en regard des données analysées au chapitre 5. Celles-ci sont reportées tableau D.2. Notons cependant que nous limitons la valeur maximale du paramètre θ_0 du fait de l’hypothèse initiale de rotations « modérées », propre au modèle utilisé.

Paramètre	Valeurs étudiées
D_0 (mm)	0.03 ; 3.5 ; 7.4
V_0 (m/s)	0.1 ; 1.5 ; 3
θ_0 (deg)	0 ; 30 ; 60

TABLE D.2 – Valeurs utilisées de déplacement, vitesse et rotation initiales des oscillations libres de la corde

D.4.2 Résultats

Les résultats obtenus ne semblent indiquer aucun effet de la rotation sur le centre de gravité spectral dans le cas de la corde A, et d'infimes variations pour la corde B. Ce résultat tend à indiquer que l'influence de la rotation sur le contenu spectral des vibrations dépend du type de corde. Ainsi, nous ne détaillerons dans cette partie que les résultats obtenus pour le cas le plus significatif que représente la corde C. Les valeurs estimées du centre de gravité spectral pour les différentes configurations envisagées de la corde C sont présentées tableau D.3. Il apparaît que le centre de gravité spectral reste stable malgré l'évolution de la rotation initiale de la corde entre 0° et 60° . Les variations observées sont de l'ordre de $10^{-4}\%$. Ainsi, ce paramètre que nous avons vu participer grandement au pincement d'un harpiste ne semble pas impliquer de variations sonores remarquables.

Cependant, les tendances ici mises en avant sont à nuancer. En effet, le modèle utilisé pour décrire le comportement vibratoire d'une corde lâchée avec un déplacement, une vitesse ainsi qu'une rotation ici n'est valable que dans le cas de rotations « modérées » [Watsky 1992]. Etudiant dans le cas présent des rotations allant jusqu'à 60° , soit un tiers de tour, cette hypothèse n'est peut être pas vérifiée pour tous les cas de figure envisagés. L'introduction d'un modèle adapté à de plus grandes rotations de la corde pourra être une perspective intéressante afin de conclure quant au rôle de la rotation dans le pincement, entre paramètre de contrôle du geste musical et paramètre mécanique influant sur le contenu spectral produit. Enfin, l'usage de ce modèle dans un cas où la corde n'est pas considérée fixe à ses deux extrémités sera utile à l'analyse de l'influence de la rotation sur le couplage entre les deux polarisations des vibrations de la corde, probablement influent sur l'amortissement de celles-ci.

CGS	$\theta_0 = 0^\circ$	$\theta_0 = 30^\circ$	$\theta_0 = 60^\circ$
$D_0 = 0.03$ (mm) et $V_0 = 0.1$ (m/s)	31.4Hz	$-5 \times 10^{-4}\%$	$-10 \times 10^{-4}\%$
$D_0 = 0.03$ (mm) et $V_0 = 1.5$ (m/s)	31.4Hz	$-5 \times 10^{-4}\%$	$-10 \times 10^{-4}\%$
$D_0 = 0.03$ (mm) et $V_0 = 3$ (m/s)	31.4Hz	$-5 \times 10^{-4}\%$	$-10 \times 10^{-4}\%$
$D_0 = 3.5$ (mm) et $V_0 = 0.1$ (m/s)	33.4Hz	$-2 \times 10^{-4}\%$	$-3 \times 10^{-4}\%$
$D_0 = 3.5$ (mm) et $V_0 = 1.5$ (m/s)	31.8Hz	$-3 \times 10^{-4}\%$	$-6 \times 10^{-4}\%$
$D_0 = 3.5$ (mm) et $V_0 = 3$ (m/s)	31.5Hz	$-4 \times 10^{-4}\%$	$-9 \times 10^{-4}\%$
$D_0 = 7.4$ (mm) et $V_0 = 0.1$ (m/s)	33.5Hz	$-2 \times 10^{-4}\%$	$-3 \times 10^{-4}\%$
$D_0 = 7.4$ (mm) et $V_0 = 1.5$ (m/s)	32.4Hz	$-1 \times 10^{-4}\%$	$-3 \times 10^{-4}\%$
$D_0 = 7.4$ (mm) et $V_0 = 3$ (m/s)	31.8Hz	$-3 \times 10^{-4}\%$	$-6 \times 10^{-4}\%$

TABLE D.3 – CGS (Hz) estimé pour différentes combinaisons de conditions initiales en déplacement et vitesse avec une rotation initiale nulle associé aux pourcentages de variation avec augmentation de la rotation initiale.

Annexe E

Comparaison des performances de deux modèles d'accroche

Au cours du chapitre 7, nous proposons un modèle de pincement de corde de harpe. Celui-ci est décomposé en deux parties correspondant chacune à une phase caractéristique du pincement : l'accroche ou le glissement. Afin de modéliser l'interaction entre le doigt et la corde au cours de l'accroche, une modélisation du comportement viscoélastique du doigt est proposée à partir d'un modèle de Kelvin-Voigt.

Celui-ci est constitué de deux éléments, un amortissement noté c_f et une raideur k_f . Un complément de réponse quant à la dépendance de ces deux éléments en l'enfoncement de la corde dans le doigt —noté δ_u au chapitre 7— est apporté ici. En effet, un premier résultat issu de l'analyse de l'erreur de reconstruction commise en fonction de la dépendance choisie (linéaire ou exponentielle) a indiqué que le coefficient d'amortissement dépendait exponentiellement de δ_u (cf figure 7.5). Cependant, le choix de la forme linéaire de l'élément de raideur k_f n'a pas pu être explicité au chapitre 7, faute de place.

Rappelons que l'élément k_f est envisagé sous les deux formes suivantes :

$$\text{Modèle A : } k_f^{exp} = k_f^{a-exp} e^{k_f^b \delta_u}, \quad (\text{E.0.1})$$

$$\text{Modèle B : } k_f^{lin} = k_f^{a-lin} \delta_u, \quad (\text{E.0.2})$$

Les estimations des paramètres k_f^{a-lin} , k_f^{a-exp} et k_f^b sont présentées au tableau E.1. Elles ont été réalisées dans le cas des pincements effectués par le doigt robotisé ainsi que par une harpiste. Quatre pincements sont étudiés concernant le doigt robotisé, un effectué avec l'embout référencé F1 et quatre avec celui noté F2, de même qu'au chapitre 5. On constate que la variabilité du paramètre k_f^{a-exp} autour de sa valeur moyenne est meilleure que celle de k_f^{a-lin} avec des valeurs de 1% et de 13% pour le premier contre 4% et 13% pour le second, respectivement pour les doigts robotisé et humain. Cependant, il n'en est pas de même pour le paramètre k_f^b pour lequel la variabilité autour de sa valeur moyenne atteint respectivement 47% et 171% pour le doigt robotisé et le doigt de la harpiste.

L'évolution de la caractéristique de raideur k_f en fonction de l'enfoncement de la corde dans le doigt δ_u est proposée figure E.1 pour chacun des cas considérés. Dans le cas du doigt robotisé

		k_f^{a-exp} (N.m ⁻¹)	k_f^b (m ⁻¹)		k_f^{a-lin} (N.m ⁻¹)
Doigt robotisé					
F1	Modèle A	1650	1.2	Modèle B	350
F2		1646	0.6		311
F2		1621	0.5		339
F2		1643	0.6		326
Harpiste					
P_1	Modèle A	1738	1.5	Modèle B	1785
P_2		2258	0.0		1701
P_3		2111	1.1		1350
P_4		1260	164.5		294
P_5		2041	0.0		1067
P_6		2009	0.3		714
P_7		1697	0.0		788
P_8		2463	0.1		1015

TABLE E.1 – Estimations des paramètres de raideur k_f du doigt robotisé et du doigt de la harpiste pour chacun des pincements étudiés dans le cas des deux modèles de raideur k_f^{a-lin} et k_f^{a-exp} envisagés.

comme dans le cas de la harpiste, il apparaît que le comportement de la raideur tend à être linéaire dans le cas du modèle A, du fait des faibles valeurs relevées pour le paramètre k_f^b . Une seule courbe ne semble pas suivre cette tendance, correspondant au pincement P_4 de la harpiste. Dans ce cas, k_f^b prend une valeur sept fois supérieure à sa valeur moyenne. En effet, $\langle k_f^b \rangle = 21\text{m}^{-1}$ dans le cas de la harpiste d'après le tableau E.1. Ce cas est donc considéré comme problématique et écarté de la présente discussion. De plus, les courbes obtenues à l'aide du modèle B sont plus cohérentes entre elles que celles obtenues par le biais du modèle A. En effet, concernant le doigt robotisé, les trois courbes obtenues avec le même embout en silicone noté F2 sont semblables les une aux autres dans le cas où la raideur est considérée linéaire, contrairement au cas exponentiel. Finalement, la faible importance de k_f^b nous amène à simplifier le modèle employé et à réduire le nombre de paramètres estimés à trois : k_f^a , c_f^a et c_f^b . Comme indiqué lors du chapitre 5, le modèle B, comportant un élément de raideur évoluant linéairement avec l'enfoncement de la corde sur le doigt est donc choisi.

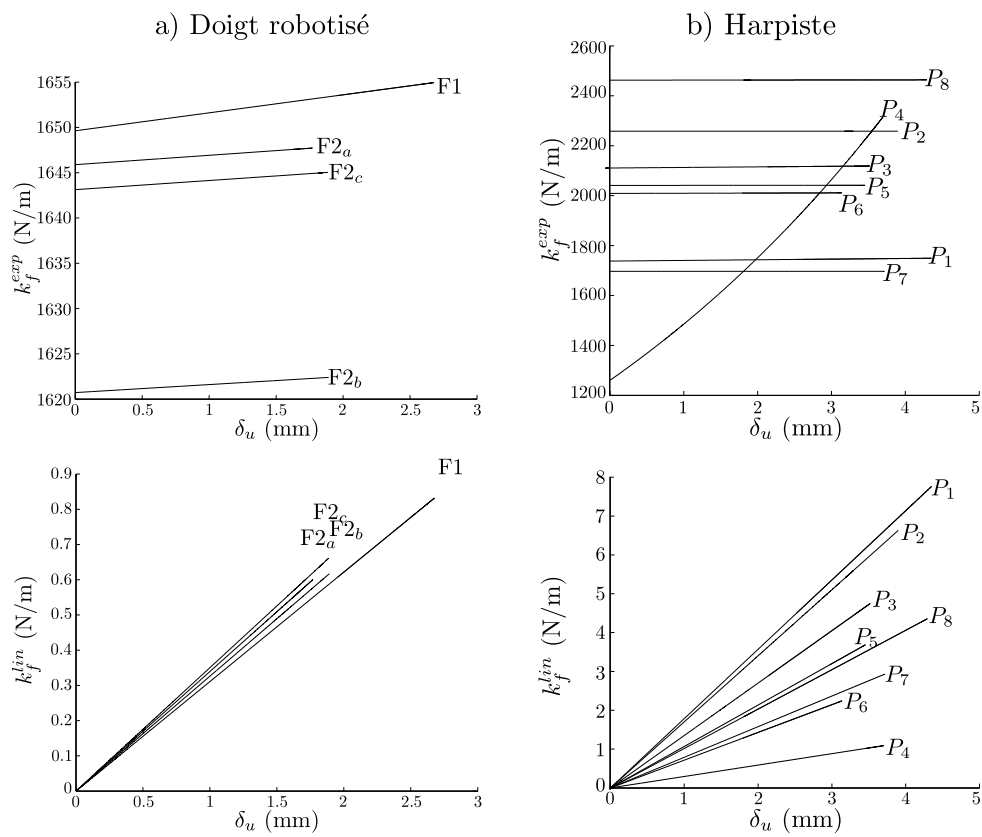


FIGURE E.1 – Evolution de la caractéristique de raideur a) du doigt artificiel et b) de la harpiste en fonction de l'enfoncement de la corde. a) Cas du modèle exponentiel, et b) Cas du modèle linéaire

Liste des tableaux

4.1	Characteristics of the strings involved in the study.	31
4.2		37
4.3	Left arm joints rotation (deg) computed during harp performance, according to systems of reference defined in Fig. 4.3. The mean is computed on the three repetitions, i.e. on the 42 chords performed by each harpist.	39
4.4		40
4.5		40
4.6		41
4.7		42
5.1	Characteristics of studied strings [Le Carrou 2006]. The trajectory study is performed on Db2	52
5.2	Sticking phase durations for each harpist and musical context. The mean is computed on three and six plucking actions respectively for chord and arpeggio at each fingering. The reported uncertainty represents a 95% confidence interval . .	61
5.3	Slipping phase durations for each harpist and musical context. The mean is computed on three and six plucking actions respectively for chord and arpeggio at each fingering. The reported uncertainty represents a 95% confidence interval . .	62
5.4	Maximum angular deviation applied to the string during the sticking phase. The mean is computed on five and seven plucking actions respectively for chord and arpeggio. The reported uncertainty represents a 95% confidence interval	63
5.5	Cutoff frequencies for each string under study, implied by a finite excitation width, estimated at 2 cm	65
5.6	Initial angle of attack for each musician. The mean is computed on five and seven plucking actions respectively for chord and arpeggio. The reported uncertainty is an uncertainty with a 95% confidence interval	66
6.1	Robotic finger specifications.	79
6.2	Silicone fingertips characteristics.	82
6.3	Classification of the silicone fingertips according to characteristic descriptors of the plucking action. The grayed-colored boxes correspond to the global better fingertips. The bold values correspond to the closest silicone fingertip to the reference for the considered descriptor.	88

7.1	Stiffness (k_f^a) and damping (c_f^a , c_f^b) coefficients estimated with the model A and the percentage of reconstruction quadratic error $\tilde{\epsilon}$ according to the string's displacement for the whole set of robotic and human plucking actions.	102
7.2	Friction coefficients (μ) and percentage of reconstruction quadratic error $\tilde{\epsilon}$ according to the string's displacement estimated for the whole set of robotic and human plucking actions.	104
7.3	Influence of the plucking parameters on the initial condition of the string vibrations. F_{max} , δ_s and μ are considered to vary from 1N to 10N, from 0.1mm to 2mm, and from 0.87 to 1.0, respectively.	109
7.4	Influence of the initial condition of the string vibrations D_{tr} and V_{tr} on the spectral descriptors CGS and σ^2 . D_{tr} and V_{tr} are considered to vary from 0.03mm to 7.4mm and from 0.1 to 3m/s.	109
7.5	Influence of the plucking parameters on the initial conditions of the string vibrations. Note that some boxes are empty because some experimental data are missing or because of post-processing problems. Arp-Ann, Arp-For, Ch-Ann and Ch-For referred to the four musical context investigated, i.e. Arpeggio performed with the annular and the forefinger and chord performed with the annular and the forefinger.	112
6	Review of experimental results for the friction coefficient of finger skin with various probe materials[Derler and Gerhardt 2012].	114
7	Review of experimental results for the friction coefficient of forearm skin contacting with a spherical probe[Derler and Gerhardt 2012].	114
C.1	Mesures des grandeurs d'entrée dans le cadre des différents montages expérimentaux mis en place.	156
C.2	Estimation des incertitudes de mesure sur les grandeurs du montage.	156
C.3	Estimations des grandeurs d'entrée et de leurs incertitudes lors des différents montages.	157
C.4	Estimation de l'incertitude engendrée par l'algorithme de tracking	158
D.1	Caractéristiques des cordes utilisées pour estimer l'impact de sa rotation initiale sur ses oscillations. D'après [Le Carrou 2006].	167
D.2	Valeurs utilisées de déplacement, vitesse et rotation initiales des oscillations libres de la corde	168
D.3	CGS (Hz) estimé pour différentes combinaisons de conditions initiales en déplacement et vitesse avec une rotation initiale nulle associé aux pourcentages de variation avec augmentation de la rotation initiale.	169
E.1	Estimations des paramètres de raideur k_f du doigt robotisé et du doigt de la harpiste pour chacun des pincements étudiés dans le cas des deux modèles de raideur k_f^{a-lin} et k_f^{a-exp} envisagés.	172

Table des figures

2.1	Exemples de positionnement de la main droite sur les cordes de harpe pour jouer une séquence d'arpèges. a) Vue de face et b) vue de trois quart.	9
2.2	Exemple de positionnement de la main droite sur les cordes de harpe pour jouer un accord. Pour les besoins de l'expérience, une corde a dû être retirée.	10
2.3	Harpe de concert Camac Harps, Atlantide modèle Prestige, utilisée au cours de ce travail. Photo de l'instrument extraite de www.camac-harps.com	11
2.4	Caractéristiques des cordes de quelques instruments à cordes.	12
3.1	Photographie d'un harpiste prise lors d'une séance de mesures consistant en la capture de ses mouvements au cours de l'exécution d'un morceau. Elle est associée à la schématisation des squelettes reconstruits du musicien (marqueurs rouges) et de l'instrument (marqueurs gris) en trois dimensions.	24
3.2	Schématisation du protocole expérimental mis en place pour étudier le pincement d'une corde de harpe. Un image obtenue par le biais de la caméra rapide est présentée, ainsi qu'un couple de trajectoires du doigt et de la corde dans le plan d'étude.	25
3.3	Photographie prise pendant la capture du pincement d'une corde de harpe à l'aide d'une caméra rapide.	25
4.1	Score of the analyzed excerpt of the Debussy's <i>Danse Profane</i>	30
4.2	Experimental setup.	31
4.3	Illustration of the global (X,Y,Z) and local $((x_a, y_a, z_a), (x_f, y_f, z_f), (x_u, y_u, z_u))$ reference systems used for the upper-limb motion.	33
4.4	Stick diagram of the left arm movements during the performance of a D-octave, during the last excerpt performance by the three harpists.	35
4.5	Repeatability and characteristics of the three harpist's left hand movement related to each octave at the third performance of the Debussy's <i>Danse Profane</i> excerpt.	35
4.6	Definition of characteristic angles for the harpists' posture related to the concert harp, in realistic playing conditions.	38
4.7	Acoustical level, computed on a 150ms moving average, associated to the percentage of <i>tempo</i> deviation for each note and the maximal shoulder's displacement (mm). These descriptors are computed on the last execution of the excerpt by the three harpists.	44

5.1	Experimental setup.	50
5.2	Markers used to determine finger and string trajectories, and string rotation, during the plucking action.	51
5.3	Finger and string interaction phases. a) Approach phase. b) Sticking phase. c) Slipping phase. d) String vibrations	54
5.4	Finger trajectory during the plucking and string trajectory during both, plucking and free oscillations, in the (x0z) plane. a) Frame of reference definition. b) Finger and string trajectories.	55
5.5	Repeatability and characteristics of finger movement for two harpists performing an arpeggio sequence with the annular finger. t_c and t_r correspond to the beginning and the end of the finger/string contact.	59
5.6	Illustration of the variety of finger movements during the harp plucking for one harpist. t_c and t_r correspond to the beginning and the end of the finger/string contact.	60
5.7	Dimensionless plucking position R_{y0} measured on 9 harpists for the 9th, 16th, 23th and 30th strings, for 290 observations	64
5.8	Initial conditions of the string vibrations for different harpists, musical context and fingering. The mean is computed on five and seven plucking actions respectively for chord and arpeggio. The reported uncertainty represents a 95% confidence interval. a) Chord sequences. b) Arpeggio sequences.	67
5.9	Spectrograms computed on isolated Db2 with forefinger for different harpists. (Color online)	68
5.10	Photographie du doigt artificiel mis en place sur une harpe de concert afin d'en pincer les cordes.	74
5.11	Photographie du montage expérimental lors de l'évaluation des performances du doigt artificiel.	75
5.12	Modélisation proposée de l'interaction doigt-corde pendant les deux phases du pincement que sont a) la phase d'accroche et b) la phase de glissement. Les déplacement de la phalange et de la corde sont notés (x_f, z_f) et (x_s, z_s)	75
6.1	Artificial finger on its frame (left) and rigidly fixed on the harp's column (right).	80
6.2	Robot kinematics	80
6.3	Description of the Fingertip : bone in aluminum and fingertip in silicone.	81
6.4	Silicone fingertips of three different shapes : B-C-A	81
6.5	a) Picture of the experimental setup with a human finger and the artificial one. b) Images obtained through the high-speed camera for a robotic plucking action in both the direct and the mirror views.	83
6.6	Harpist forefinger movement during plucking actions. The grayed movement is used as reference for the robot.	83

6.7	Comparison of each silicone fingertips trajectory with robotic finger and reference trajectories. Plain line : Silicone fingertip. Dotted line : Robotic finger. Dashed line : Harpist finger trajectory which is defined as reference. t_c , t_s and t_r represent the beginning of the sticking, slipping and vibration phases, respectively.	85
6.8	Waveforms and spectrograms of accelerometer's signals measured on the sound-board at the bottom of the 30th string (Db2 at 138.6Hz) which is plucked by the harpist and by the robotic finger with each silicone fingertip. Spectrograms are shown in dB using a 70dB dynamic.	87
7.1	Finger/string interaction during the sticking phase and its equivalent modeling. .	95
7.2	Finger/string interaction during the slipping phase.	98
7.3	Summurize of the harp plucking modeling	99
7.4	Experimental setup using a) robotized and b) real plucking actions.	100
7.5	Evolution of the reconstruction error of a reference curve versus its signal to noise ratio.	101
7.6	Measured and simulated plucking action. a) Plucking action performed by a real harpist finger, b) with an additional adjustment of the string orientation, c) Plucking action performed by the artifical finger, and d) with an additional adjustment of the string orientation.	105
7.7	Trajectories of the finger and the string estimated through measurements of a robotic plucking action with the A5-fingertip. They are associated to the modeled string trajectory in the $(x0z)$ plane for a large range of finger's parameters values. a) Reference, b) k_f^a : minimum value, c) k_f^a : maximum value, d) c_f^a : minimum value, e) c_f^a : maximum value, f) c_f^b : minimum value, and g) c_f^b : maximum value. 108	
A.1	Positions des marqueurs réfléchissant sur le corps du musicien. Plug-in-Gait marker placement protocol, Vicon.	143
B.1	Répétabilité et caractéristiques des mouvements effectués par la main gauche du harpiste dans le plan $(y0z)$. Ces mesures ont été effectuées à trois reprises sur l'extrait étudié de la <i>Danse Profane</i> de C.Debussy.	145
B.2	Répétabilité et caractéristiques des mouvements effectués par la main gauche du harpiste dans le plan $(x0y)$. Ces mesures ont été effectuées à trois reprises sur l'extrait étudié de la <i>Danse Profane</i> de C.Debussy.	146
B.3	Répétabilité et caractéristiques des mouvements effectués par la main gauche du harpiste dans le plan $(x0z)$. Ces mesures ont été effectuées à trois reprises sur l'extrait étudié de la <i>Danse Profane</i> de C.Debussy.	146
C.1	Schématisation du protocole de mesure.	150
C.2	Trajectoire d'un pincement de corde effectuée par le doigt artificiel et son mouvement estimé par le biais d'une caméra rapide.	151
C.3	Exemples d'images synthétisées avec un faible ($PSNR \mapsto \infty$) et un fort ($PSNR \mapsto 9.4dB$) niveau de bruit.	158

C.4	Trajectoires estimées du doigt pendant un pincement de corde, suivant les axes $\vec{e}_x$ et $\vec{e}_z$. L'incertitude autour de la valeur estimée est présentée en pointillés et est calculée avec un taux de confiance à 95%.	159
D.1	Schématisation de la corde pincée étudiée et notations associée.	162
E.1	Evolution de la caractéristique de raideur a) du doigt artificiel et b) de la harpiste en fonction de l'enfoncement de la corde. a) Cas du modèle exponentiel, et b) Cas du modèle linéaire	173

Résumé

Dans le domaine de l'acoustique musicale, les recherches visant à la compréhension des instruments ont rendu possible la modélisation et la synthèse sonore de nombre d'entre eux. Cependant, le degré de connaissance acquis d'un système matériel, si élevé soit-il, ne permet pas à lui seul de prédire son comportement à la suite d'une interaction avec l'homme. L'étude de l'interaction entre musicien et instrument fait ainsi l'objet de nombreux travaux de recherche afin de prendre en considération son effet sur la production sonore et d'effectuer, à terme, des synthèses sonores plus réalistes. Au cours de leur apprentissage, les musiciens développent une importante maîtrise de leur instrument de manière à exécuter précisément les gestes nécessaires à la qualité sonore désirée. La mise en évidence des paramètres de contrôle pertinents vis-à-vis du son produit, dans le cas de la harpe de concert, est au centre de ce travail de thèse. Dans un premier temps, cette interaction est étudiée à l'échelle du musicien par le biais d'une analyse de ses gestes instrumentaux et ancillaires en relation avec le contexte et l'intention musicale. La seconde partie de ce travail se focalise sur la cause directe de la production sonore, i.e. le pincement de la corde. La spécificité et l'importante répétabilité de ce geste pour chaque instrumentiste est ainsi mise en évidence. Enfin, une modélisation de l'interaction entre le doigt du musicien et la corde de harpe enrichie des précédents résultats est proposée, validée par l'utilisation d'un doigt artificiel contrôlable et paramétrable.

Abstract

The physics of musical instruments has been studied to a point where many instruments can now be modeled to produce realistic sound synthesis. However, the knowledge of the mechanics of any system is not sufficient to predict its behavior after a human interaction. Thus, the investigation of the musician-instrument interaction is an active field of research, which aims at including the musician impact on the sound production. Eventually, it will be valuable to provide more realistic sound synthesis. Over the years, trained instrumentalists develop the ability to produce notes in a specific and reproducible way. They learn how to control their gestures to perform each note with the desired acoustical features. This thesis studies the control parameters used by the harpist in relation to the produced sound. First, the player/harp interaction has been investigated by characterizing the musical gestures in relation to the musical interpretation. Then, we focused on the gesture directly involved in the sound production, i.e. the plucking action. This analysis had underlined the characteristics of string plucking, both highly reproducible and player-specific. Finally, a previous model of the finger / string interaction has been enhanced by using these results. It has been validated by a repeatable and configurable robotic finger.