





Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Sfax
Institut Supérieur de Musique de Sfax

Mémoire de Master de Recherche

Master en Musique, Son et Technologies

"Qanoun" augmenté

Automatiser les degrés spécifiques des "maqams" ou des "tubu's" pendant le jeu

Réalisé par :
Yosra Ketata

Sous la direction de :
M. Majdi Abid
Mme. Hend Zouari

Année universitaire : 2025 – 2026







Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Sfax
Institut Supérieur de Musique de Sfax

Mémoire de Master de Recherche

Master en Musique, Son et Technologies

Qanoun augmenté

Automatiser les degrés spécifiques des "maqams" ou des "tubu's" pendant le jeu

Réalisé par :
Yosra Ketata

Sous la direction de :
M. Majdi Abid
Mme. Hend Zouari

Année universitaire : 2025 – 2026

Dédicace

Je dédie ce travail, d'abord et avant tout,
À mes parents et ma sœur,
pour leur amour inconditionnel, pour leur infini soutien et leur confiance sans faille en ma personne.

À mon directeur de recherche, M. Majdi Abid,
Pour ses conseils pertinents, pour son encouragement, sa disponibilité, sa volonté de suivre mon parcours académique et pour son aide précieuse tout au long de ce travail.

À ma directrice de recherche, Mme. Hend Zouari,
Pour ses conseils pertinents, pour son encouragement, sa disponibilité, sa volonté de suivre mon parcours académique et pour son aide précieuse dans la réalisation de ce travail.

À ma chère Nesrine Walha,
Ta présence, ton soutien et ta douceur ont illuminé mon parcours et mon cœur.

Remerciements

En premier lieu, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers toute ma famille. Leur amour inébranlable, leur soutien sans faille et leur patience infinie m'ont accompagné tout au long de ce parcours. Sans eux, je n'aurais jamais pu mener à bien ce travail. Leur confiance et leur affection ont été ma source d'inspiration et de force quotidienne.

Ensuite,je suis profondément reconnaissante envers mon directeur de recherche, M. Majdi Abid, pour ses conseils avisés, ses retours constructifs, son soutien constant, et sa disponibilité inestimable. Votre direction a été déterminante non seulement dans la réalisation de ce travail, mais aussi dans mon parcours académique et ma formation professionnelle, en m'aidant à identifier des problèmes, à envisager des solutions et à progresser à chaque étape.

Aussi, je souhaite exprimer ma profonde gratitude à ma directrice de recherche, Mme. Hend Zouari, qui est à l'origine même de l'idée fondatrice de ce projet. C'est à partir de sa vision créative que ce travail a vu le jour. Grâce à sa sagesse, à ses orientations scientifiques pertinentes et à son accompagnement constant, elle a largement contribué à la construction et à l'évolution de ce travail. Son soutien intellectuel et son suivi rigoureux ont été des éléments essentiels dans sa réussite et son enrichissement.

Pour conclure,je souhaite exprimer ma profonde gratitude à mes amis pour leurs encouragements, leur patience et leur appui constant. Je remercie tout particulièrement Nesrine Walha, qui a toujours été à mes côtés, ainsi que Med.Ramzi Njeh, mon ami d'enfance . Je tiens également à remercier Omar Zayeni, Ahmed Nouri et Ramzi Ammar, mes supérieurs au travail, pour leur accompagnement, leur confiance et leur soutien indispensable, tant dans les moments difficiles que dans ceux de réussite. Votre amitié et votre engagement ont constitué un véritable pilier tout au long de ce parcours.

Table des matières

Dédicace

Remerciements

Introduction générale **1**

Chapitre I : Le qanoun : Parcours historique et transformations **3**

I.1 Introduction 4
I.2 Historique 4
I.3 Evolution 6
I.3.1 Les origines organologiques : de la cithare sur table à la cithare sur caisse 6
I.3.2 L'adoption du qanoun et la transformation dans le monde arabe et ottoman 9
I.4 L'art du sillet : technique et évolution 11
I.4.1 Le qanoun sans sillets 11
I.4.2 L'apparition du sillets 13
I.5 Caractéristiques techniques du qanoun moderne 14
I.6 L'art du qanuniste : analyse des techniques de jeu et de l'instrumentation 15
I.7 Mécanismes de production et de contrôle sonore du qanoun . . 16
I.8 Les maqams et les tubu‘s dans la musique Arabe 17
I.8.1 Les maqams dans la musique orientale 17
I.8.2 Les tubu‘s dans la musique Tunisienne 18
I.9 Les micros intervalles dans le langage maqamique 19
I.10 Les limites de l'instrument 19

I.11 Les instruments de musique augmentés : vers une nouvelle génération d'interfaces musicales interactives 20
I.12 Conclusion 23

Chapitre II : Étude et prototypage d'un mécanisme automatisé de réglage des maqams et des tubu's du qanoun **24**
II.1 Introduction 25
II.2 Analyse des solutions techniques : avantages et inconvénients . . 25
II.2.1 Première solution : système à cames 25
II.2.1.1 Les avantages de la première solution 26
II.2.1.2 Les inconvénients de la première solution . . 26
II.2.2 Deuxième solution : mini solénoide électrique linéaire . 27
II.2.2.1 Cahier des charges de la deuxième solution . . 27
II.2.2.2 Les avantages de la deuxième solution 27
II.2.2.3 Les inconvénients de la deuxième solution . . 28
II.2.3 Troisième solution : moteur pas à pas 30
II.2.3.1 Cahier des charges de la troisième solution . . 31
II.2.3.2 Les avantages de la troisième solution 32
II.2.3.3 Les inconvénients de la troisième solution . . 34
II.3 Conception du support 34
II.3.1 Le premier support 34
II.3.2 Le second support 35
II.3.3 Le troisième support 35
II.4 Instalation et programmation Arduino 37
II.4.1 Les équipements électroniques 37
II.4.1.1 La carte Arduino Uno R3 37
II.4.1.2 Driver du moteur pas à pas 38
II.4.2 Circuit de commande 39
II.4.3 Programmation Arduino 39
II.4.3.1 Explication des bibliothèques incluses dans le programme Arduino 40
II.4.3.2 Configuration des moteurs pas-à-pas 40
II.4.3.3 Déclaration des moteurs 41

II.4.3.4 Vitesses de déplacements des moteurs 41
II.4.3.5 Technique de remise à zéro des moteurs . . . 42
II.4.3.6 Cablage des boutons 42
II.4.3.7 Gestion des déplacements des sillets 43
II.4.3.8 Détection du clic ou double clics 43
II.4.3.9 Fonction : déconnection des bobines 44
II.4.3.10 Fonction : déplacement simultané 44
II.5 Conclusion 45

Chapitre III : Mesures et résultats **46**
III.1 Introduction 47
III.2 Les mesures de l'emplacement des sillets 47
III.3 Timbre du qanoun avec le nouveau système 49
III.3.1 Microphone de mesure Behringer ECM 8000 49
III.3.2 La carte son M-Track Solo 50
III.4 Les résultats obtenus 51
III.4.1 Les résultats obtenus pour la note RE(D) 52
III.4.2 Les résultat obtenus pour la note MI(E) 53
III.4.3 Les résultat obtenus pour la note FA(F) 55
III.4.4 Les résultat obtenus pour la note SOL(G) 57
III.5 Analyse finale des résultats 59
III.6 Conclusion 59

Conclusion **60**

Bibliographie **64**

Liste des figures **67**

Liste des tableaux **69**

Introduction

La musique se manifeste comme un langage universel dont les expressions culturelles et régionales s'avèrent d'une infinie richesse. Au sein des traditions musicales orientales et ottomanes, la pensée mélodique se structure autour du système modal du 'maqam' décliné en Tunisie sous la forme spécifique du 'tubu''. Ce système se distingue fondamentalement du tempérament égal occidental par l'usage subtil de micro-intervalles et par une grande fluidité dans les modulations. Au cœur de cette esthétique, le qanoun, cithare traditionnelle à cordes pincées, incarne par excellence la délicatesse et la complexité de ce répertoire.

Cependant, la configuration organologique classique de cet instrument engendre une contrainte technique majeure. Pour modifier la hauteur des notes et naviguer entre les différents modes en cours d'exécution, le musicien est contraint de manipuler manuellement, à l'aide de sa main gauche, de petits leviers métalliques appelés sillets. Ce geste technique indispensable s'effectue au détriment de l'expressivité musicale : la main gauche se retrouve accaparée par une tâche purement mécanique, ce qui limite considérablement l'exécution simultanée d'ornements, de lignes de basse ou de contre-chants, tout en fragmentant la fluidité du jeu. C'est face à cette limite physique que se positionne le concept d'instrument augmenté, visant à marier l'héritage traditionnel et l'apport des technologies numériques pour libérer le geste créatif.

Dans le cadre de ce travail de recherche, l'ambition consiste à concevoir, développer et évaluer un prototype de qanoun augmenté doté d'un système mécanique automatisé agissant simultanément sur quatre notes fondamentales (Ré, Mi, Fa, Sol). Ce choix dimensionnel n'est pas fortuit, puisqu'il correspond à l'assise minimale d'un 'jins' (genre), cellule de base nécessaire pour définir et faire varier les fondations d'un 'maqam' ou d'un 'tubu''.

Dès lors, la transition d'un contrôle manuel et ponctuel vers une automatisation multidimensionnelle soulève la problématique centrale suivante :

Comment la conception et l'implémentation d'un système mécanique automatisé à quatre actionneurs sur le qanoun peuvent-elles concrétiser le passage dynamique et précis d'un mode à un autre, tout en garantissant la fidélité micro-intervallique, en préservant l'intégrité acoustique de l'instrument et en offrant une interface de contrôle adaptée à la performance en temps réel ?

Afin de guider notre démarche d'ingénierie et de validation musicale, nous formulons deux hypothèses directrices.

La première hypothèse suppose que l'intégration d'un mécanisme automatisé, basé sur des micro-moteurs pas-à-pas pilotés par une architecture Arduino, permet d'effectuer des changements de modes maqam ou tubu‘ de manière quasi instantanée et reproductible. Un tel système offrirait ainsi au musicien une plus grande liberté d'exécution en libérant la main gauche des manipulations mécaniques des sillets, sans perturber la continuité temporelle de la performance musicale.

Dans le prolongement de cette approche, la seconde hypothèse considère que l'utilisation de sillets motorisés conçus dans un matériau approprié permettrait de préserver la justesse microtonale propre aux échelles orientales, tout en maintenant la signature acoustique globale et la richesse harmonique caractéristiques du qanoun traditionnel.

Pour vérifier ces hypothèses, notre travail s'articule autour de trois étapes successives. En premier lieu, une analyse organologique et technique explicitera les fondements et les limites de l'instrument traditionnel. Ensuite, l'étude, le prototypage mécanique et la programmation électronique du système à quatre actionneurs seront détaillés. Enfin, une campagne de mesures et d'analyses acoustiques comparatives permettra d'évaluer objectivement l'impact de cette automatisation sur la justesse et le timbre du qanoun augmenté.

Chapitre I

Le qanoun : Parcours historique et transformations

I.1 Introduction

Dans le premier chapitre, on va retracer le parcours du "qanoun", depuis ses origines de cithare ancienne jusqu'à son rôle central dans la musique arabe et ottomane.

On s'intéressera d'abord à la manière dont l'instrument s'est transformé physiquement, notamment avec l'arrivée des sillets qui ont totalement changé la façon de jouer les micro-intervalles. L'idée est aussi de comprendre l'art du qanouniste à travers les systèmes de maqam et de tubu‘ Tunisien. Enfin, on verra que, malgré sa richesse, l'instrument rencontre certaines limites techniques. C'est ce qui nous amènera à explorer l'univers des instruments augmentés, où la tradition rencontre les nouvelles technologies pour créer une nouvelle génération d'interfaces musicales.

I.2 Historique

Le qanoun est un instrument à cordes pincées très répandu dans la musique traditionnelle,il appartient à la famille des cithares.

D'après un entretien avec Imane Homsy[1][1], les origines lointaines du qanoun, et plus généralement des cithares sur caisse, demeurent incertaines, se situant dans une période large entre l'Antiquité et le Moyen Âge, aussi bien en Orient qu'en Occident.

Elle explique également que cet instrument à cordes a connu un long cheminement historique avant d'atteindre sa forme aboutie. Son développement et sa diffusion se sont largement accélérés à partir du début du XIXème siècle. Depuis lors, sa présence s'est étendue et solidifiée dans tout le Proche-Orient, ainsi qu'en Turquie, en Grèce et en Afrique du Nord, où il occupe une place importante dans les traditions musicales actuelles.

«Cet instrument mystérieux comprend une palette sonore riche que ce soit dans les aigus ou dans les graves.» [2]

Sur le forum toute la musique du monde[3], dédié à la musique classique et aux traditions globales, une discussion éclairante revient sur l'étymologie et l'héritage antique du qanoun. Il y est rappelé que le nom arabe de l'instrument,

1. Imane Homsy était une virtuose libanaise du qanoun — un instrument à cordes pincées traditionnel du monde arabe (similaire à une cithare) — considérée comme l'une des plus importantes interprètes de cet instrument au Liban et à l'international

« القانون » (al-qanun), trouverait son origine dans le mot grec « Kanon » — signifiant « la mesure » ou « la règle ». Ce même terme désignait dans l'Antiquité un instrument monocorde, essentiellement un outil pédagogique et théorique utilisé pour l'étude précise des intervalles musicaux. Il est notable que cet ancêtre conceptuel du qanoun était déjà connu de Pythagore[2], figure majeure de la pensée grecque qui a fondé l'analyse mathématique des rapports acoustiques, établissant un pont immémorial entre les nombres et l'harmonie des sons.

L'histoire ancienne du qanoun n'est pas bien connue. Plusieurs théories s'affrontent concernant son origine, encore incertaine.

Selon l'une d'elles, le qanoun était connu des anciens Grecs, une deuxième le considère comme un instrument analogue de l'Inde ancienne, une troisième lui attribue en même temps trois origines différentes : la harpe égyptienne ancienne, un instrument assyrien et le « monocorde » grec.
D'autres théories considèrent l'invention de l'instrument de la paternité du philosophe arabe al-Farâbî[3] pour sa part, l'a développée, embellie, raffinée, et y a apporté des modifications et des améliorations pour qu'elle prenne sa forme actuelle Dans ce contexte, Jamal Abid[4] déclare "Al-Fârâbî est celui qui a développé le qanoun, et il l'a peut-être conçu à partir d'un instrument qu'il utilisait pour mesurer les rapports des intervalles musicaux."

2. Pythagore, philosophe et mathématicien grec du VIe siècle av. J.-C., est le premier à avoir établi une relation entre la musique et les mathématiques

3. Al-Fârâbî est connu sous le nom d'Abou Nasr Al-Fârâbî, en référence à la ville où il est né, Farab. Il est né en 874 apr. J.-C. et est décédé en 950. C'était un philosophe érudit dans de nombreux domaines et sciences, tels que la médecine, la musique, la physique et la philosophie.

4. Jamel Abid est un musicien et pédagogue Tunisien né en 1958 à Sfax, spécialiste de l'enseignement et de la diffusion de la musique arabe à travers l'instrument du qanoun.



Figure I.1 – Le qanoun Tunisien

En tant qu'élément représentatif par excellence de la musique arabe, le qanoun n'est pas seulement un instrument d'appropriation mais également un instrument bien particulier à l'ouverture vers d'autres traditions musicales. Grâce à sa capacité d'adaptation, le qanoun a été mis à même de s'ouvrir aux systèmes harmoniques plus proches de ceux utilisés dans le monde occidental grâce à l'introduction des leviers.

Dès lors a été possible son intégration dans des genres tels que le jazz, les musiques improvisées ou des formes de musique contemporaine dans lesquelles cet instrument est devenu au même titre qu'un instrument porteur de mémoire et de tradition, l'élément approprié au dialogue interculturel.

I.3 Evolution

Les origines du qanoun moderne se rattachent à une longue histoire d'évolution des instruments à cordes pincées qui passera progressivement de la cithare sur table à la cithare sur caisse.

I.3.1 Les origines organologiques : de la cithare sur table à la cithare sur caisse

D'après le chercheur Ghassen Sahhab[4] les origines de la cithare sur table en Orient et en Occident se perdent entre l'Antiquité et le Moyen Âge .

L'une des premières cithares représentées sans ambiguité sur table ou caisse dans l'Europe médiévale sont des cithares en table, à partir du IXe siècle.

Dans le site Musiconis[5], on peut voir une photo (figure I.2) du Roi Da-

vid jouant de la cithare sur table rectangulaire.« La position de jeu est verticale.»



Figure I.2 – Le roi David jouant de la cithare

Pour ce qui est de l'Orient, le premier témoignage connu montrant la position de jeu d'un cithariste qui joue sur une caisse de résonance est celui d'un musicien arabe d'un manuscrit égyptien du XIVe siècle, le Kasf al-gumum(figureI.3).



Figure I.3 – Le Kasf al-gumum, XIVe

«A cette époque, le mot qanoun est déjà utilisé par certains auteurs. Farmer cite un grand joueur de qanoun du XIIIe siècle : Shams al-Dīn al-Dahmān,

qui était aussi un poète (H.G. Farmer, 1931, 16). » [4]

On va maintenant traiter une autre sous-catégorie d'images : celles relevant de la zone de contact entre l'Orient et l'Occident.



Figure I.4 – Femme jouant d'une cithare tenue à la verticale, Acre, Palestine

D'un côté, on trouve à Saint-Jean d'AcreSaint-Jean-d'Acre[5], en Palestine, une peinture murale représentant une femme jouant sur une cithare à corps allongé(figureI.4) : il s'agit d'une cithare de table et non d'un modèle de caisse ; culturellement, cette image est très ambiguë ; elle est localisée, à Acre, en Terre Sainte, dans un territoire disputé entre Croisés et Musulmans, après notamment la reconquête musulmane de la ville de Tripoli en 1249 ; au surplus, cette image est très orientale par son style pictural, elle est peut-être copte ou orientale-romaine.

En Andalousie, on trouve dans le manuscrit des Cantigas de Santa Maria (XIIIe siècle) plusieurs cithares sur cadre en position de jeu(figure I.5), dont celle-ci :

5. désigne une ville historique située sur la côte méditerranéenne de la Palestine historique, aujourd'hui connue sous le nom d'Acre (Akko).



Figure I.5 – Psaltérions, Cantigas de Santa Maria

Ce n'est que par la suite que s'impose la position horizontale. Ce changement serait lié à un agrandissement progressif de la caisse de résonance, rendant l'instrument trop volumineux pour le tenir verticalement et à un passage de l'usage liturgique ou symbolique à un usage profane, et musicalement plus exigeant .

Cette transformation constitue un moment décisif de la transition vers le qanoun tel qu'il sera façonné et perfectionné au temps ottomans.

I.3.2 L'adoption du qanoun et la transformation dans le monde arabe et ottoman

La forme moderne du qanoun telle qu'on la connaît aujourd'hui s'est principalement développée à la fin du XVIIIe siècle sous l'influence de l'Empire ottoman. Parmi les dessins au trait de Van Mour[6], vers 1714, apparaît une femme jouant d'un qanoun dont les dimensions ressemblent au qanoun moderne (figure I.6). Cet instrument est tenu à l'horizontale mais avec une structure qui ressemble au qanoun du XVIe siècle (forme rectangulaire). Les chevilles sont à droite, et l'instrument est tout en bois. Feldman[7] dit « cet instrument était utilisé dans le Harem par des filles, comme le montre une peinture datée en 1719 »

6. Jean Baptiste Vanmour ou Van Mour (9 janvier 1671 - 22 janvier 1737) [1] était un peintre flamand - français , connu pour sa représentation détaillée de la vie dans l' Empire ottoman pendant l' ère des tulipes et le règne du sultan Ahmed III

7. Walter Zev Feldman est un chercheur et professeur d'ethnomusicologie renommé, surtout connu pour ses travaux sur la musique de cour ottomane, les traditions musicales turques classiques et les musiques juives.

(celle de Van Mour) (idem). »[4]



Figure I.6 – Qanoun, Harem de la cour Ottomane, Constantinople, XVIIIe

« A partir de la fin du Dix huitième siècle, on découvre enfin un qanoun, qui se présente sous une forme presque identique à celle qu'on le connaît aujourd'hui et principalement dans la tradition arabe et la tradition Turque » [4]

D'une part, il est alors complément différencié du santur[8] , désormais identifié à la tradition iranienne, et ceci par son mode de jeu ainsi que par sa forme (trapèze rectangle) et son volume (il est de taille relativement grande).

L'évolution majeure entre la fin du XVIIe siècle et le milieu du XVIIIe siècle, semble avoir été l'adjonction d'une ou plusieurs peaux sur la partie droite de la table d'harmonie, avec la fonction évidente de résonateur, donc probablement pour lui donner une sonorité plus puissante.

Si on n'avait trouvé aucune image du qanoun à la Cour d'Istanbul au XVIIe siècle, on trouve enfin un témoignage incontestable à la fin du XVIIIe siècle : l'illustration qui apparaît dans l'appendice du manuscrit de hidir agaa (1765-1770) (figure I.7) , (Feldman, 1996, 157)[9]

8. Le mot "santur" désigne un instrument de musique à cordes frappées, de la famille des cithares.

9. Ce manuscrit, détenu par la bibliothèque du Palais Topkapi à Istanbul, a été pris pour un manuscrit en langue turc par Feldmann.

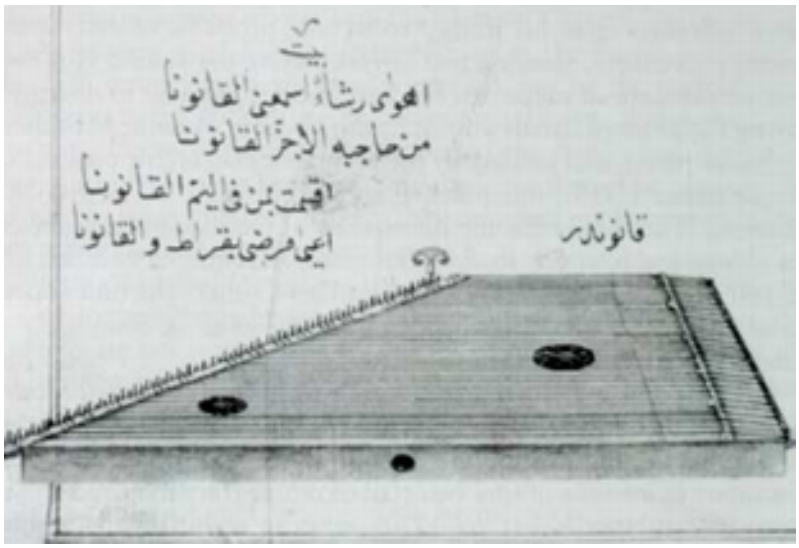


Figure I.7 – Qanoun, hidir agaa (fin du XVIIIe)

« L'introduction officielle du qanoun dans la musique ottoman est souvent attribuée à un musicien syrien du Caire, Omer Efendi, sous le règne du sultan Mahmoud II (1808-1839) au début du XIXe siècle.»[6]

Depuis lors, le qanoun est devenu un instrument essentiel des orchestres classiques ottomans, et s'est diffusé dans tout le Proche-Orient, ainsi qu'en Grèce, en Iran, en Arménie ou en Afrique du Nord, chaque espace développant des variations appropriées à ses traditions musicales. Ainsi, en dehors des apports de la période ottomane, l'introduction du sillet est sans doute l'évolution la plus déterminante dans l'histoire du qanoun, amorçant une nouvelle phase de son évolution.

I.4 L'art du sillet : technique et évolution

I.4.1 Le qanoun sans sillets

Avant l'apparition des sillets métalliques à la fin du XIXe siècle , le qanoun traditionnel était constitué de vingt quatre choeurs de cordes doublées ou triplées , chacune correspondant à une note de l'échelle du maqam arabe. Les cordes étaient accordées selon un système descendant sur une étendue d'environ trois octaves. Dans le même cadre historique, les qanoun Turcs possédaient un registre plus étendu que celui des qanoun arabes incluant les notes graves et aigues. Avant l'agencement de leviers, toute intervention sur la hauteur d'une

note du maqam rast(راست) à celui du maqam hijaz(حجاز) nécessitait une intervention manuelle directe sur la corde, via une technique du nom de 'afq'(عفق) permettant de freiner la corde légèrement avec le pouce pour réaliser le micro intervalle escompté, ce qui exigeait une grande acuité auditive ainsi qu'une technique au point, le musicien étant seul capable de maintenir la justesse de l'intonation tout en conservant la fluidité de l'exécution instrumentale.

Muhammadal Aqqad al kabir[10] (1841–1930/31) incarne l'un des derniers grands maitres du qanoun traditionnel sans sillets. Refusant les dispositifs métalliques apparus à la fin du XIXe siècle, il considérait l'instrument ancien comme plus fidèle à la sonorité naturelle et à l'esprit de la musique orientale. Dans un article de 1912, il affirmait « Aujourd'hui, les qanoun sont complets, avec des pièces métalliques. Mais moi, j'utilise toujours le qanoun sans leviers. »[7]

Son jeu se distinguait par une extrême précision, scrupuleuse, associée à un subtil contrôle des micro-intervalles, non pas produit par un mécanisme, mais par la seule pression du pouce sur la corde, ce qui lui permettait d'alternativement faire varier la hauteur du son selon une échelle fine tout en préservant la continuité mélodique inhérente au maqam. Les enregistrements des années 1906-1931 révèlent un style d'une expressivité fluente se situant encore résolument dans le cadre acoustique du qanoun.



Figure I.8 – Qanoun sans sillets

10. Muhammad al Aqqad al kabir fut un maitre du qanoun et un théoricien égyptien du début du XXe siècle, reconnu pour sa précision technique et sa contribution à l'évolution du jeu instrumental

I.4.2 L'apparition du sillets

« À la fin du XIXe siècle, l'instrument qanoun a subi une évolution extrêmement importante : l'addition de sillets » [4]

Des clapets fixés sur le côté gauche de la corde qui offrent au musicien la possibilité de modifier les degrés mélodiques par le changement facile et rapide du positionnement de ces sillets(figure I.9).

«chaque corde pouvant être montée d'un franc demi-ton par des petits leviers.» [8]

Cette transformation va faire passer l'outil instrument dans une nouvelle configuration, elle va relier la théorie des échelles musicales en Turquie et au Levant au XXème et au XXIème siècle. Un tel bouleversement a retenu l'attention des musiciens comme des manipulateurs, et s'est répandu très vite en Turquie et dans les pays arabes impliquées dans la fabrication de celui-ci.

Le nombre des sillets est la première caractéristique qui définit un qanoun car il modifie la musique jouable. Plus on a de sillets, plus on atteint des micro-intervalles petits.

• Qanoun turc : entre 5 et 12 sillets permettant des progressions par comma (musique turque).

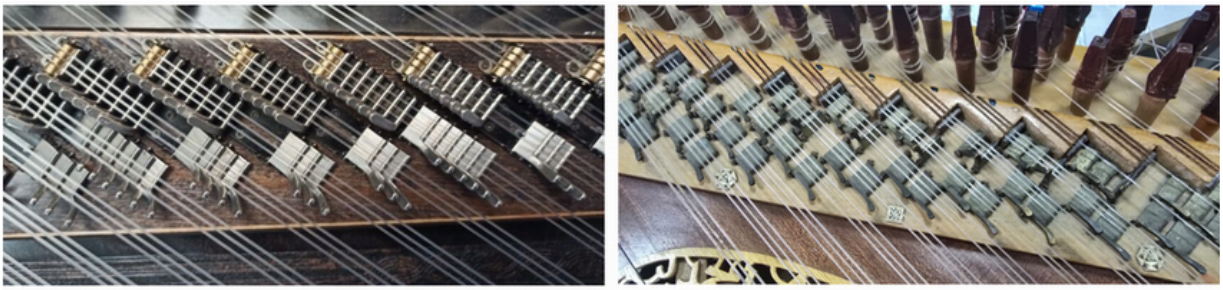
• Qanoun arabe : entre 2 et 6 sillets permettant des progressions par ¼ de ton (Le système ¼ de ton a été adopté lors du 1er congrès de la musique arabe en 1932. Mais de nos jours, il existe des qanoun arabes avec plus de leviers).

• Qanoun grec et arménien : entre 1 et 4 sillets permettant des progressions par 1/2 ton (musique occidentale). [9]

Ces sillets permettent tout juste la modalité du maqam dont l'interprétation rigoureuse s'accommode d'intervalles imposés par le jeu utilisé, à savoir, le majeur et le mineur tempéré.

Ali Jihad Racy [11] décrit comme « une adaptation ingénieuse permettant de naviguer avec fluidité entre les quarts de ton et les nuances modales des Maqamat » [10].

11. Ali Jihad Racy est un ethnomusicologue et universitaire libanais (travaillant surtout aux États-Unis) spécialisé dans les musique du Moyen-Orient et d'Afrique du Nord, en particulier la musique arabe.



A) Les sillets pour le kanoun Turc B) Les sillets pour le kanoun Tunisien

Figure I.9 – Les sillets

I.5 Caractéristiques techniques du qanoun moderne

La caisse de résonance du qanoun , confectionnée en bois et en peau de poisson tendue, se présente sous la forme d'un trapèze rectangle.

Les dimensions d'un qanoun « arabe » sont, pour la grande base, d'environ 97 cm à 100 cm, et pour la petite base, de 29,5 cm, la hauteur de ce trapèze rectangle étant de 43 ou 44 cm alors que les dimensions du qanoun joué en Turquie, en Grèce et en Arménie sont, pour la grande base, d'environ 87 cm, pour la petite base de 26 cm, la hauteur du trapèze rectangle étant de 42 cm. Soixante-douze à soixante-dix-huit cordes (de boyau, (ou) nylon, (ou) métalliques) sont tendues parallèlement sur cette caisse.

« Les cordes du qanoun sont groupées par trois elles sont attachées d'un côté à des chevilles , traversent la table d'harmonie et reposent sur le chevalet vers l'extrémité gauche de l'instrument.»[11]

L'accordage de l'instrument se caractérise par un système dans lequel les quatre sillets ou ourâb servent à accorder la note d'un quart de ton.

«Le qanoun présente la propriété d'avoir un accord variable, en quarts de tons, réalisé traditionnellement par des sillets métalliques actionnés par l'instrumentiste en cours de jeu en fonction des modulations.»[12]

De nos jours , ces sillets sont fabriqués principalement en alliages métalliques modernes tels que le cuivre-nickel zinc, offrant plus de précision et de durabilité.

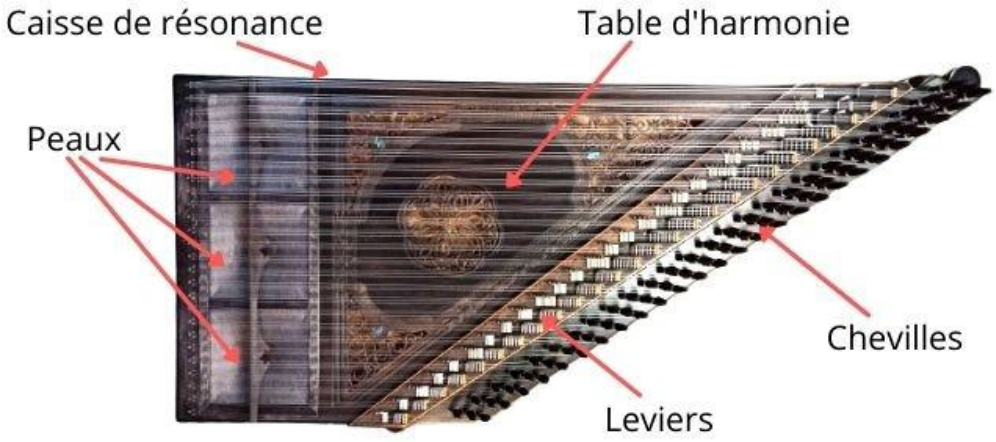


Figure I.10 – Les caractéristiques du qanoun

I.6 L'art du qanuniste : analyse des techniques de jeu et de l'instrumentation

La maîtrise du qanoun, désignée par la pratique du qanuniste, est régie par une technique instrumentale sophistiquée et un équipement spécifique le son est produit en pinçant les notes (3 cordes) à l'aide de deux plectres(figure I.12), communément appelés baguettes ou chenilles (en arabe : risha). Comme le souligne le musicologue Jean During [12] « la technique de jeu du qanoun est caractérisée par l'usage de deux plectres fixés sur les index, permettant une attaque à la fois précise et rapide des cordes »[13]

Ces plectres, traditionnellement fabriqués en corne, sont aujourd'hui souvent en plastique (deltin) pour une meilleure durabilité et flexibilité. La posture de l'instrumentiste est fondamentale ; il incline l'instrument vers lui pour obtenir une vision optimale du chevalet et des cordes.

La technique fondamentale est le tremblement (tremolo), défini par Scheherazade Hassan [13] comme « un roulement rapide et continu obtenu par l'alternance des deux index sur une même corde, créant ainsi une illusion de note tenue. » [14]

12. Jean During est un musicologue, ethnomusicologue et chercheur français spécialisé dans la musique du Moyen-Orient, en particulier la musique arabo-orientale et la musique persane.

13. SCheherazade Hassan est une ethnomusicologue franco-syrienne, spécialiste de la musique arabe et en particulier de la musique irakienne et de l'oud.

Aussi la technique avancée comme le glissando, qui consiste à faire glisser le plectre sur une série de cordes, ajoute une dimension lyrique et expressive .

La répartition des rôles entre les mains est bien définie : la main droite assure la mélodie et la vélocité, tandis que la main gauche, dite d'accompagnement, gère les basses, les appuis rythmiques et les ornements aussi les actionne de la main gauche pour modifier la hauteur des cordes.



Figure I.11 – Technique de jeu du qanoun



Figure I.12 – Les plectres et les bagues pour jouer le qanoun

I.7 Mécanismes de production et de contrôle sonore du qanoun

La production sonore du qanoun repose sur un système acoustique complexe mettant en interaction les cordes, la table d'harmonie et les cavités de résonance. Lorsque l'instrumentiste pince une corde, celle-ci entre en vibration selon sa fréquence fondamentale. Selon Ghassan Sahhab[4], les vibrations transitent par le chevalet vers la peau de poisson, laquelle les propage à l'air contenu dans la caisse, servant ainsi de véritable amplificateur acoustique.

Cette transmission d'énergie vibratoire transforme la table d'harmonie en un véritable radiateur acoustique, comme l'explique Racy [10] : « La table d'har-

monie du qanoun, par sa large surface et ses propriétés élastiques, fonctionne comme un transformateur d'impédance crucial pour le rayonnement du son dans l'air »

Le qanoun est aussi pourvu de leviers de métal que le musicien utilise pour modifier la hauteur de notes. Ces sillets permettent d'intervenir sur la tension ou sur la longueur vibrante d'une corde, créant des micro-intervalles, spécifiques à la musique arabe, ou Turque. Le musicien peut aussi faire varier le son en tirant temporairement, pendant le jeu, au moyen de l'ongle du pouce sur une corde, modifiant ainsi la fréquence.

I.8 Les maqams et les tubu‘s dans la musique Arabe

I.8.1 Les maqams dans la musique orientale

La musique orientale repose sur un ancien système modal, le maqam, fondement de la pensée mélodique dans le monde arabe, Turc et Persan. Ce système ne se limite pas à une simple succession d'intervalles : il définit un univers expressif précis, une hiérarchie entre les degrés et un mode de progression propre à chaque tradition. La musique arabe désigne un ensemble de musiques, issues du monde arabe, allant du Proche-Orient à l'Atlantique. En dépit de leurs multiples apparences et de leurs multiples influences, remontant aux Perses et aux Grecs, ces musiques, toutes de tradition orale, présentent des caractéristiques communes, bien que des particularités régionales existent. À la fin de l'Empire Ottoman, la musique arabe connut une renaissance au XXe siècle, à l'initiative d'idéologues désirant promouvoir l'identité culturelle de leur pays et de sauvegarder leur patrimoine musical. C'est à la même époque qu'apparurent certains instruments occidentaux. La musique arabe est caractérisée par une mélodie homophonique et par un système modal, le maqam. Selon Raed Belhassen « les musiques orientales se basent sur des échelles intervalliques non tempérées, sur des structures modales appelées maqam. Musicale vivante, transmise oralement, dont la richesse repose sur la subtilité des micro-intervalles et la liberté d'interprétation.»[15]

La structure intérieure du maqam repose sur des jins (pluriel ajnas). Ces jins peuvent se combiner ou se chaîner pour former des modes plus complexes. Pour Belhassen,« un maqam peut être composé de plusieurs jins créant des re-

groupements qui peuvent être assemblés, désassemblés ou imbriqués».[15]

Cette combinaison donne naissance à un climat sonore particulier, une couleur émotionnelle, un mode d'expression qui diffère d'un maqam à l'autre. Ce système établi, hérité des grandes civilisations orientales, a progressivement été transmis à tout le bassin méditerranéen et s'y est localement adapté.

I.8.2 Les tubu's dans la musique Tunisienne

En Tunisie, le système modal prend une forme particulière appelée tubu', un mode mélodique tunisien relié au maqam mais marqué par des spécificités régionales. Cette déclinaison locale est le fruit d'une riche confluence historique. «la musique Tunisienne traditionnelle a été fortement marquée par le métissage d'une population majoritairement arabe, avec les différents envahisseurs ou immigrants, ayant occupé la Tunisie à un moment ou à un autre de son histoire » [16]

Aussi selon Ouassim Chahed « la Tunisie fut l'un des carrefours qui a connu une diversité socioculturelle, à savoir berbère, romaine, arabe, andalouse, Turque et subsaharienne.»[17]

Cette confluence historique a façonné une pratique modale unique, où la structure du maqam dialogue avec des spécificités régionales.

Comme le démontre Beyhom [14] et Makhlouf dans leur analyse des enregistrements du Congrès du Caire de 1932 [15], « chaque performance et chaque analyse est unique , tandis que quelques caractéristiques peuvent s'appliquer à certaines ou la plupart des performances, la règle demeure l'existence de différences substantielles entre les différentes régions, interprètes et instruments »[18].

Parallèlement à cette diversité inhérente aux pratiques locales, les travaux du congrès ont conduit à des réformes structurelles, telles que l'adoption d'un système de notation simplifié utilisant les quarts de ton et la standardisation de certaines œuvres à travers la transcription sur partition. Cette volonté de normalisation technique s'est ainsi confrontée à la réalité complexe d'un patrimoine

14. Amine Beyhom est un musicologue libanais reconnu pour ses recherches sur les systèmes tonals microtonaux et l'analyse des maqam.

15. Le Congrès du Caire, qui s'est tenu en 1932, constitue un événement historique majeur et sans précédent pour la musique arabe, réunissant des délégations de cinq pays dans le but de sauvegarder et de protéger ce patrimoine culturel.

dont l'essence repose sur la singularité de l'interprètation.

Cette observation souligne la nature dynamique et contextuelle du système modal oriental, particulièrement dans sa déclinaison tunisienne.

I.9 Les micros intervalles dans le langage maqamique

On l'a évoqué antérieurement, tout à la fin du XIXème siècle, des petits mécanismes en acier sont fixés sur le coté gauche du qanoun, sur un support voisin des chevilles, pour réaliser des sillets, placés sous chaque corde et qui réalisent les quatre quarts de ton possibles, se substituant à l'action du pouce de la main droite du musicien qui, auparavant, pressait directement la corde pour obtenir la hauteur voulue.

Les micro intervalles constituent un élément essentiel dans le langage du maqam et dans la pratique de la musique orientale et Tunisienne .

Comme le soulignent les chercheurs «le langage du maqam transmis par tradition orale, est caractérisé par la fluctuation des degrés et des micros intervalles spécifiques à chaque maqam»[12]

Selon Mohamed Zied Zouari «il est vain de figer la hauteur d'une note demi bémol ou demi dièse dans un cadre absolu.Le degré ainsi désigné est supposé être en perpétuelle mobilité».[19]

De même, Amine Beyhom note que « Un musicologue ou un musicien expérimenté peut déterminer par l'oreille si un intervalle sort du cadre intervallique de référence».[20]

La variabilité des degrés en musique arabe ouvre ainsi la question du choix de fixer un intervalle via des ourab fixes dans le qanoun, ne semble donc pas être la solution adéquate pour ce genre de musique. Cela limite peut-être son interprétation, voilà pourquoi, cette réflexion on est amené à faire utiliser des outils numériques permettant au joueur de qanoun de pouvoir commander différents micro intervalles à caractère fluctuant en temps réels pendant le jeu.

I.10 Les limites de l'instrument

Comme l'a justement souligné M.Hend Zouari «Tout au long de ma carrière artistique, j'ai remarqué les limites de mon instrument surtout par rapport aux micros intervalles.»[21]

Aussi Lors de plusieurs discussions avec l'artiste Mme.Hend Zouari,elle

a mis en évidence les résistances auxquelles elle a été confrontée lorsqu'elle a voulu jouer du Malouf. Cette position académique reflète une conception traditionnelle de l'instrument, limitant son potentiel mélodique aux seuls intervalles tempérés. Face à ces limitations, l'artiste a fait preuve d'une remarquable ingéniosité technique en collaborant avec un forgeron pour développer un dispositif mécanique original. Cette bague, conçue spécialement pour son instrument, lui permit de jouer les micro-intervalles sur le qanoun développant ainsi sa propre technique.

Cette observation met en évidence une difficulté spécifique au qanoun oriental : son dispositif d'accordage étroit ne permet pas un rendu plus exact de la richesse microtonale des maqam arabes. Accommodé selon des divisions en quarts de ton, l'instrument impose un tempérament fixe dont la justesse et la flexibilité sont trop rigides pour certaines modulations.

L'instrument est muni naturellement de 4 sillets "Ourab" fixes. Quand les sillets sont baissés cela correspond à la note bémol. Le premier sillet levé correspond au premier quart de ton, le deuxième sillet à la note bécarre, le troisième sillet au quart de dièse, le quatrième sillet à la note dièse. Ce système est donc limité à quatre possibilités d'intervalles pour chaque note.

À cela s'ajoute la contrainte mécanique du dispositif de sillets, qui contraint l'exécutant à utiliser la main gauche pour ajuster les hauteurs, tout en jouant, et donc à restreindre la liberté d'exécution et à interdire la simultanéité de plusieurs hauteurs. Ces contraintes d'esprit et d'expressivité limitent le jeu harmonique et les possibilités d'esthétiques musicales contemporaines comme la polyphonie ou l'électronique augmentée.

I.11 Les instruments de musique augmentés : vers une nouvelle génération d'interfaces musicales interactives

Après avoir identifié certaines limites techniques et expressives du qanoun, notamment en ce qui concerne la rapidité du passage entre les maqams ou l'adaptation instantanée des altérations microtonales, il devient pertinent d'examiner les solutions développées dans le domaine des technologies musicales. Dans cette perspective, de nombreuses recherches se sont orientées vers le concept des instruments de musique augmentés, qui consistent à enrichir un instrument

acoustique traditionnel grâce à l'intégration de capteurs et de systèmes informatiques permettant de capter les gestes du musicien et de contrôler des traitements sonores numériques en temps réel.

Le violon augmenté est l'un des premiers instruments augmentés développés à l'IRCAM. Dans ce système, des capteurs miniatures sont placés sur l'archet du violon afin de capturer les gestes du musicien en temps réel. Ces capteurs mesurent différents paramètres tels que la vitesse de l'archet, l'énergie du geste ou encore le type d'articulation. Les données sont ensuite envoyées vers un ordinateur qui transforme ou synthétise le son en direct pendant la performance. Ce dispositif permet ainsi de créer une interaction dynamique entre le musicien et les traitements électroniques, où les gestes instrumentaux contrôlent directement les processus sonores. Ce type d'instrument a été utilisé notamment dans l'oeuvre BogenLied (2005) de Florence Baschet pour violon augmenté et électronique en temps réel.[23]



Figure I.13 – Le violon augmenté

Parmi les exemples emblématiques de cette approche, on peut citer l'electrumpet,est un instrument hybride basé sur une trompette acoustique à laquelle sont ajoutés plusieurs capteurs et contrôleurs électroniques. Ces capteurs permettent au musicien de contrôler des paramètres sonores numériques en temps réel, tels que les effets, la transposition ou la synthèse sonore. L'instrument in-

tègre notamment des capteurs de pression, des potentiomètres et des interrupteurs numériques, ainsi qu'une connexion Bluetooth permettant de transmettre les données vers un ordinateur où les traitements sonores sont effectués dans des environnements comme Max/MSP. Cette configuration permet de combiner la technique traditionnelle de la trompette avec des possibilités sonores élargies, créant ainsi un instrument hybride qui associe performance acoustique et traitement numérique. [22]

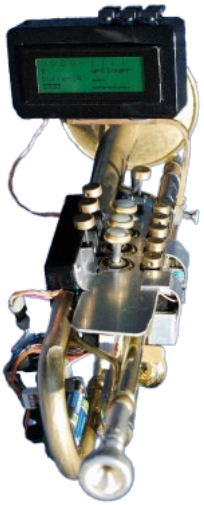


Figure I.14 – le Electrumpet

Dans le prolongement direct de notre travail, une première preuve de concept pour le qanoun, développée par M.Chouvel, Mme.Zouari, M.Quartier et M.Fabre, a démontré la faisabilité technique d'un système automatisé sur une note unique. [24]

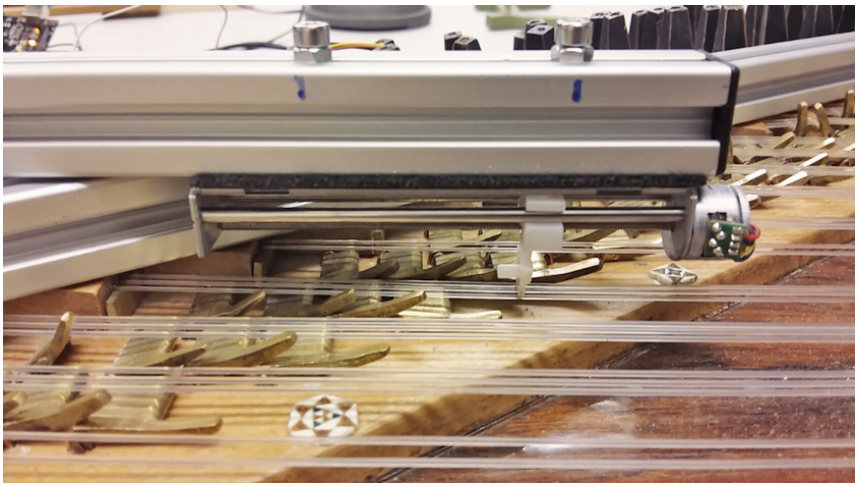


Figure I.15 – La première preuve de concept pour le qanoun

I.12 Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en évidence les contraintes techniques du qanoun traditionnel, dont le système de sillets fixes limite la fluidité et la justesse des micro-intervalles. L'analyse des besoins artistiques, couplée aux avancées des instruments augmentés, a conduit au développement d'une solution innovante : l'automatisation du passage d'un maqam à un autre. En intégrant des outils numériques et mécaniques, on parvient à dépasser la rigidité de l'instrument classique pour offrir une flexibilité mélodique en temps réel, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives esthétiques pour la musique orientale contemporaine.

Chapitre II

Étude et prototypage d’un mécanisme automatisé de réglage des maqams et des tubu‘s du qanoun

II.1 Introduction

Au sein de ce chapitre, on va tout d'abord présenter les solutions envisagées pour le réglage des maqam , le but de remplacer le sillet traditionnel manuel par un système automatisé, afin d'aider le travail du musicien (qanuniste) en améliorant la souplesse et la rapidité d'exécution du passage d'un maqam à un autre, d'une part.D'autre part, ça permet d'avoir plus de flexibilité dans les reglages allant jusqu'à avoir les tubu'tunisienne. Nous analyserons ensuite différents types d'intégration des moteurs sur le qanoun et leurs avantages et limites respectives.Puis nous finirons par développer notre solution retenue, à savoir le support choisi et l'approche de programmation prise pour sa mise en œuvre.

II.2 Analyse des solutions techniques : avantages et inconvénients

II.2.1 Première solution : système à cames

La première conception, modélisée sous SolidWorks, repose sur un système à cames destiné à transformer un déplacement rotatif en divers mouvements alternatifs linéaires. Il est constitué d'un arbre rotatif dans lequel sont fixées plusieurs cames avec différentes orientations .

Lorsque l'arbre tourne, on observe que chacune des cames transmet une pression sur un poussoir vertical qui se déplace vers le bas avant de revenir à sa position initiale .

Le dispositif est tenu par un châssis rigide qui maintient bien l'axe droit. Un moteur transmet le mouvement à l'arbre pour une rotation continue et régulière. La forme de chaque came détermine le profil du mouvement du poussoir (montée rapide, descente lente, maintien en position, etc.).

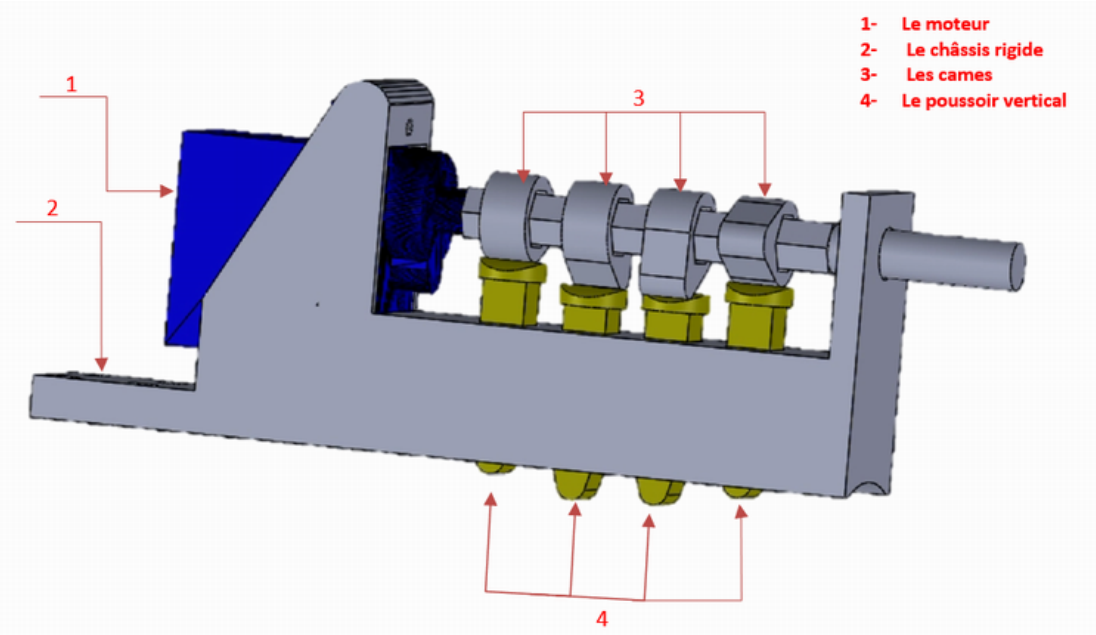


Figure II.1 – Conception du système à cames

II.2.1.1 Les avantages de la première solution

Le Système à cames présente un certain nombre d'avantages ce qui justifie sa large utilisation dans de nombreuses applications. D'abord en raison de sa grande précision dans le mouvement, il permet de convertir un mouvement rotatif en mouvement alternatif ou complexe. Ensuite il permet de contrôler la vitesse et la position, ce qui présente un intérêt notable dans notre cas. Enfin il est aussi fiable et durable.

II.2.1.2 Les inconvénients de la première solution

En dépit de la diversité de ses bénéfices, le système à cames comporte quelques limites. Il occupe un espace relativement important dans le mécanisme. De plus, il est fixe et peu adaptable : en cas de modification du profil ou du mouvement souhaité, il est souvent nécessaire de reconstruire la came, ce qui limite sa flexibilité. Enfin, pour des applications nécessitant des micro-intervalles ou des variations très fines, comme dans le cas de certains tubu‘ , le système à cames ne permet pas d'obtenir une précision suffisante, rendant impossible la reproduction exacte de ces petites nuances.

II.2.2 Deuxième solution : mini solénoide électrique linéaire

Ce mini solénoïde linéaire de type push-pull [25] est un électroaimant compact (8 mm × 10 mm) conçu pour générer un mouvement de poussée ou de traction précis. Son noyau magnétique, actionné par une bobine, se déplace sur une course courte de 4 mm contre la force d'un ressort intégré. Sa construction nervurée favorise la dissipation thermique. Polyvalent, il s'alimente en courant continu (DC) avec une plage de tension allant de 3 V à 12 V, ce qui lui permet de s'adapter à diverses applications.

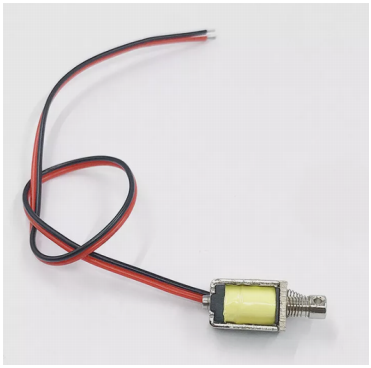


Figure II.2 – Mini solénoide linéaire

II.2.2.1 Cahier des charges de la deuxième solution

Le tableau II.1 présente les spécifications techniques du mini solénoïde ainsi que les exigences minimales requises par le système de réglage automatique des sillets du qanoun.

II.2.2.2 Les avantages de la deuxième solution

Ce mini solénoïde présente plusieurs atouts qui ont motivé son étude dans le cadre de ce projet. Sa compatibilité avec des tensions standards (3 V, 5 V, 9 V, 12 V) lui permet de s'intégrer facilement à des systèmes électroniques embarqués courants, tels qu'un microcontrôleur Arduino ou ESP32.

La commutation binaire push-pull offre une réponse rapide (temps de commutation inférieur à 20 ms), adaptée à un jeu musical en temps réel.

Son format rectangulaire compact (8 mm × 10 mm) et la présence d'un ressort de rappel intégré constituent des atouts mécaniques indéniables pour l'intégration dans des espaces réduits. Enfin, son coût unitaire faible représente un

Paramètre	Unité	Solénoïde mini	Requis (qanoun)
Tension d'alimentation	V	3 – 12	–
Courant nominal (12 V)	A	0,83	–
Puissance consommée	W	10	–
Course du piston	mm	4	–
Force de poussée nominale	N	0,5	**1 – 2**
Diamètre de la tige	mm	7	–
Section de contact	m^2	$3{,}85 \times 10^{-5}$	–
Pression de contact	bar	0,13	**0,30 – 0,50**
Résistance de bobine	Ω	14,4	–
Cycle de service maximal	%	5 – 50	–
Température de fonctionnement	°C	−5 à 40	–

Table II.1 – Cahier des charges — mini solénoïde push-pull vs exigences du qanoun

avantage économique non négligeable en phase de prototypage.

II.2.2.3 Les inconvénients de la deuxième solution

Après analyse approfondie et tests préliminaires, plusieurs limitations critiques ont été identifiées, rendant ce solénoïde inadapté au cahier des charges du système.

La cause fondamentale du rejet de cette solution est l'insuffisance de la pression exercée par le solénoïde sur le sillet . Cette insuffisance découle directement de la faiblesse de la force électromagnétique développée par la bobine miniature.

La pression P exercée par la tige du solénoïde sur le levier est donnée par la relation :

$$P = \frac{F}{A} \tag{II.1}$$

où F est la force développée par le solénoïde (en N) et A la section de contact de la tige (en m^2). La section circulaire de la tige de diamètre $d = 7$ mm est :

$$A = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \times (3{,}5 \times 10^{-3})^2 \approx 3{,}85 \times 10^{-5}\ \text{m}^2 \tag{II.2}$$

En substituant dans l'équation (II.1) la force nominale maximale $F_{\max} = 0{,}5\,\text{N}$ du solénoïde à 12 V :

$$P_{\text{solénoïde}} = \frac{0{,}5}{3{,}85 \times 10^{-5}} \approx 13\,000\ \text{Pa} = \mathbf{0{,}13}\ \text{bar} \tag{II.3}$$

Or, Le seuil de pression minimale nécessaire au basculement fiable du sillet a été déterminé expérimentalement à l'aide d'un dynamomètre à ressort appliqué manuellement sur un sillet du qanoun de référence, en mesurant la force au moment du franchissement de la position stable. Cette mesure conduit à une pression minimale estimée à :

$$P_{\text{requise}} \geq 0{,}30\ \text{bar} \tag{II.4}$$

Le rapport d'insuffisance est donc :

$$R = \frac{P_{\text{requise}}}{P_{\text{solénoïde}}} = \frac{0{,}30}{0{,}13} \approx 2{,}3 \tag{II.5}$$

La pression générée est ainsi environ 2,3 fois inférieure à la valeur minimale requise. Cette insuffisance entraîne un risque de positionnement intermédiaire du sillet ni levé ni abaissé produisant une altération de hauteur non maîtrisée, incompatible avec la précision musicale exigée (incompatible avec la précision musicale exigée. Le seuil de tolérance retenu dans ce travail, fixé à ±5 cents, correspond au seuil de discrimination mélodique généralement admis dans la littérature ethnomusicologique pour la perception d'un écart microtonal en contexte de jeu réel.).

Aussi le qanoun possède de 24 à 27 cours de cordes, chaque note comporte de 5 à 12 sillets selon le modèle (arabe ou turc). Il serait donc nécessaire de déployer un solénoïde par sillet, soit plusieurs centaines d'actionneurs au total. Cette contrainte rend la mise en place mécaniquement difficile, augmente considérablement le coût du système et génère un encombrement incompatible avec le confort de jeu du musicien.

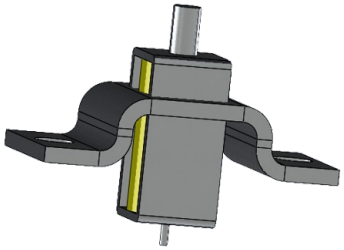


Figure II.3 – Systéme de fixation du solenoide

La puissance dissipée par effet Joule dans la bobine, à partir de la résistance nominale Rb = 14,4 et du courant nominal I = 0,83 A sous 12 V (Tableau II.1), est :

$$P_J = R_b \cdot I^2 = 14{,}4\ \Omega \times (0.83\ \text{A})^2 = 9.9\ \text{W} \tag{II.6}$$

Cette valeur, cohérente avec la puissance consommée annoncée par le constructeur (10 W, Tableau II.1), confirme un échauffement continu incompatible avec un maintien prolongé sous tension lors d'un usage musical.

II.2.3 Troisième solution : moteur pas à pas

La troisième solution étudiée est un micro-moteur pas à pas bipolaire à actionneur linéaire intégré [26]. Ce composant de diamètre 15 mm est équipé d'une tige filetée (vis mère) de 90 mm de longueur et de 3 mm de diamètre, offrant une course linéaire utile de 80 mm. Son principe de fonctionnement repose sur la conversion directe d'un mouvement rotatif pas à pas en un déplacement linéaire de l'écrou coulissant, grâce à un pas de vis de 0,5 mm. Le moteur comporte 2 phases et 4 fils, avec une résistance de phase de 15,5 Ω, et s'alimente sous une tension continue comprise entre 4 et 9 V pour un courant de 100 à 500 mA par phase. Son angle de pas de 18° correspond à 20 pas par tour complet, ce qui lui confère une résolution linéaire élémentaire particulièrement fine, adaptée à un positionnement précis et stable du sillet du qanoun.

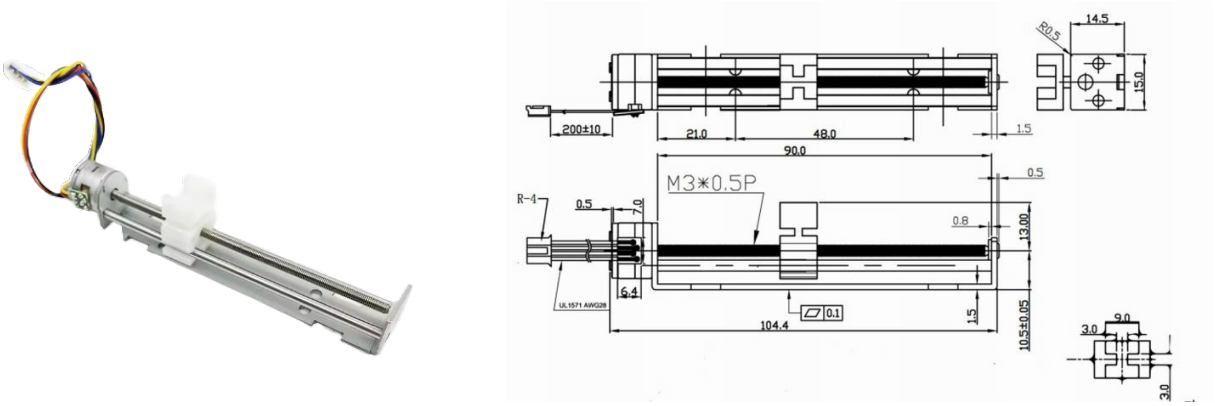


Figure II.4 – Dimension du moteur pas à pas choisit

II.2.3.1 Cahier des charges de la troisième solution

Le tableau II.2 présente les spécifications techniques du moteur pas à pas linéaire retenu, comparées aux exigences du système de réglage automatique des sillets du qanoun.

Paramètre	Unité	Moteur pas à pas	Requis (qanoun)
Tension d'alimentation	V	5 – 9	–
Courant par phase	mA	100 – 500	–
Résistance de phase	Ω	15,5	–
Puissance consommée	W	2,06 – 10,45	–
Angle de pas	°/pas	18	–
Nombre de pas par tour	pas/tr	20	–
Pas de vis	mm/tr	0,5	–
Résolution linéaire	mm/pas	**0,025**	–
Course linéaire utile	mm	80	3 – 10
Longueur vis mère	mm	90	≤ 100
Diamètre vis	mm	3	–
Diamètre moteur	mm	15	15
Couple moteur (15 mm)	mN·m	≈ 15	–
Force linéaire effective	N	2 – 5	1 – 2
Couple de maintien	mN·m	≈ 8	–
Vitesse linéaire max.	mm/s	2,5	–
Pilote requis	—	A4988 / DRV8825	compatible MCU

Table II.2 – Cahier des charges — moteur pas à pas linéaire vs exigences du qanoun

II.2.3.2 Les avantages de la troisième solution

Le moteur avec un système vis-écrou linéaire permet un mouvement linéaire précis et stable. Sa large plage de tension (5 à 9 V) le rend compatible avec de nombreux contrôleurs, en particulier la carte Arduino.

Ce mécanisme présente plusieurs atouts décisifs pour le système de réglage automatique des sillets du qanoun : le contrôle pas à pas assure un positionnement reproductible, tandis que sa compacité et sa légèreté facilitent l'intégration dans des espaces restreints. De plus, le mécanisme vis-écrou maintient efficacement la position sous charge modérée, offrant une stabilité et une fiabilité indispensables pour garantir la justesse des cordes.

L'intégration de ce moteur repose sur les caractéristiques cinématiques et dynamiques détaillées ci-après :

La résolution linéaire d représente le déplacement de l'écrou pour un seul pas moteur. Elle est donnée par la relation suivante :

$$d = \frac{p}{N} \tag{II.7}$$

où p est le pas de la vis (en mm) et N le nombre de pas par tour. En appliquant les valeurs de ce moteur ($p = 0{,}5$ mm et $N = 20$ pas) :

$$d = \frac{0{,}5 \text{ mm}}{20 \text{ pas}} = \mathbf{0{,}025} \text{ mm/pas} \tag{II.8}$$

Cette résolution est 6 fois supérieure à celle du solénoïde et permet un positionnement du sillet à $\pm 0{,}025$ mm, bien en deçà de la tolérance musicale admissible.

La transformation du couple moteur C en force linéaire F s'effectue via la vis mère. En tenant compte du rendement mécanique $\eta \approx 0{,}30$, la relation est :

$$F = \frac{2\pi \cdot C \cdot \eta}{p} \tag{II.9}$$

En substituant le couple nominal $C = 15 \times 10^{-3}$ N·m :

$$F = \frac{2\pi \times 15 \times 10^{-3} \times 0{,}30}{0{,}5 \times 10^{-3}} \approx \mathbf{56{,}5} \text{ N} \tag{II.10}$$

Cette valeur théorique est largement supérieure aux 1 à 2 N requis. En pratique, malgré les frottements, la force effective de l'ordre de **2 à 5 N** reste suffisante pour notre application.

La puissance dissipée dans chaque bobine est calculée par la loi d'Ohm $P = V^2/R$. Pour l'ensemble du moteur (2 phases) :

$$P_{\text{totale}} = 2 \times \frac{V^2}{R_{\text{phase}}} \quad \Rightarrow \quad P_{\text{totale}} \in [3{,}2 \ ; \ 10{,}4] \text{ W} \tag{II.11}$$

La vitesse v de l'écrou dépend de la fréquence d'impulsion f envoyée au

pilote :

$$v = d \times f = \frac{p}{N} \times f \tag{II.12}$$

Pour une fréquence de pilotage de 100 pas/s :

$$v = 0{,}025 \text{ mm} \times 100 \text{ pas/s} = \mathbf{2{,}5} \text{ mm/s} \tag{II.13}$$

Cette vitesse est parfaitement adaptée à la commande en temps réel des sillets, permettant de naviguer entre les micro-intervalles (commas, quarts de ton) avec fluidité.

II.2.3.3 Les inconvénients de la troisième solution

Ce moteur nécessite un driver adapté pour fonctionner correctement, aussi, il n'est pas équipé d'un encodeur pour connaître la position de l'écrou en temps réelle. Sous une tension faible comme 5 V, appliquer une charge supplémentaire, comme le frottement d'une corde de qanoun, peut bloquer le moteur.

II.3 Conception du support

II.3.1 Le premier support

La première étape était l'imagination et la conception à l'aide de SolidWorks d'un support destiné à étre fixé sur le qanoun, au-dessus du sillet, accueillant les moteurs pas à pas. Aprés la réalisation et le découpage de la tole , il s'est avéré trop fine et plexible ce qui le rend inadapté pour supporter le poids et l'effort des moteurs .

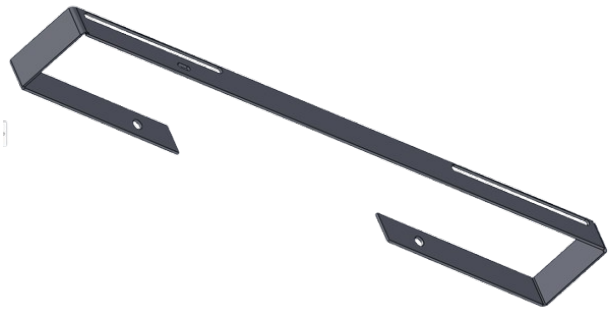


Figure II.5 – Conception du premier support

II.3.2 Le second support

Afin de remedier au défaut du premier support et de s'integrer parfaitement avec le qanoun ,nous avons conçu un second support, réalisé en bois, qui présentait des qualités esthétiques notables. Cependant, son intégration mécanique a révélé deux contraintes techniques majeures.

La première venait de la présence de cales fixées sous le support qui empêchaient la flexion de ce dernier (figure II.6). Ces cales font obstacle au positionnement des moteurs et rendaient l'accés difficile.

La seconde contrainte tient au fait que le support n'est pas réglable, ce qui complique son positionnement précis sur le qanoun. Cette absence d'ajustement, associée aux marges d'installation trop étroites imposées par la hauteur et la largeur sous la surface, empêche à la fois un alignement correct avec les cordes du qanoun et une fixation stable et fonctionnelle des moteurs. La combinaison de ces deux facteurs l'obstacle des cales et l'absence de réglage compliquant l'intégration mécanique , impose une révision de la conception du support afin de garantir la fiabilité du montage.



Figure II.6 – Conception du second support

II.3.3 Le troisième support

Afin de surmonté ces contraintes, on a conçu un troisième support qui résout ces problèmes. Cette solution optimale consiste en un support modulaire

en bois, structuré autour de quatre sous-ensembles fonctionnels. Il répond systématiquement aux contraintes d'optimisation spatiale, d'intégration harmonieuse et de fiabilité mécanique. Un support moteur à largeur réduite facilite l'intégration des actionneurs, sur lequel se fixe une cage de protection alliant sécurité et esthétique. La fixation stable et réversible sur le qanoun est assurée par deux pinces de montage. L'ensemble est assemblé et réglable avec précision via un axe central muni d'écrous et contre-écrous. L'alignement parallèle des moteurs est obligatoire pour éviter le choc entre les sillets lors du déplacement. Il est assuré par une pièce intermédiaire imprimée en 3D.

Ce composant assure une fonction géométrique essentielle en maintenant le positionnement parfaitement parallèle et aligné des quatres actionneurs, condition indispensable à l'uniformité du point de contact et à l'équilibre mécanique de l'ensemble. la figure II.7 montre l'ensemble de tous le système monté sur le qanoun.

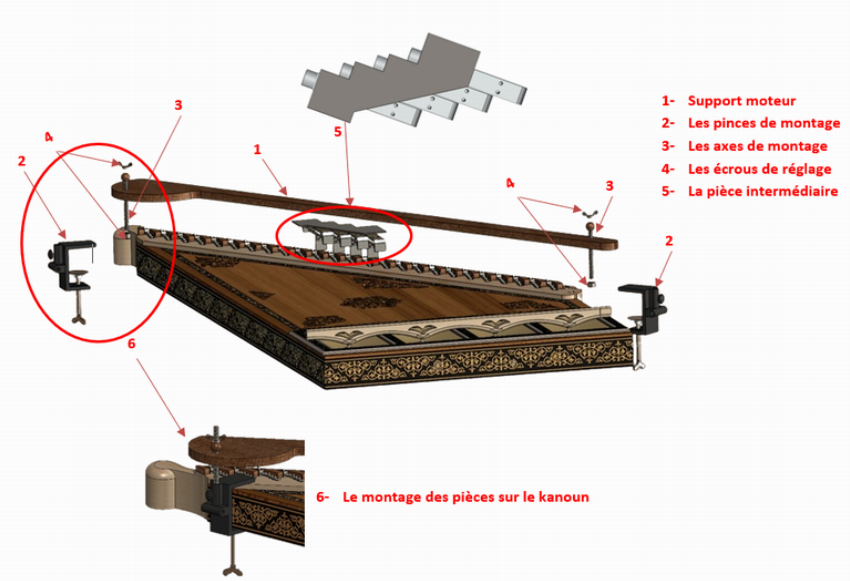


Figure II.7 – Conception du support moteur

Enfin, la pièce qui va glisser sur les cordes est découpé par laser sur une tole en inox et fixé aux tiges des moteurs (figure II.8 et II.9) ; cette pièce remplace les sillets traditionnels au point de contact corde-actionneur, assurant un engagement précis, durable et fonctionnel avec les cordes cibles.

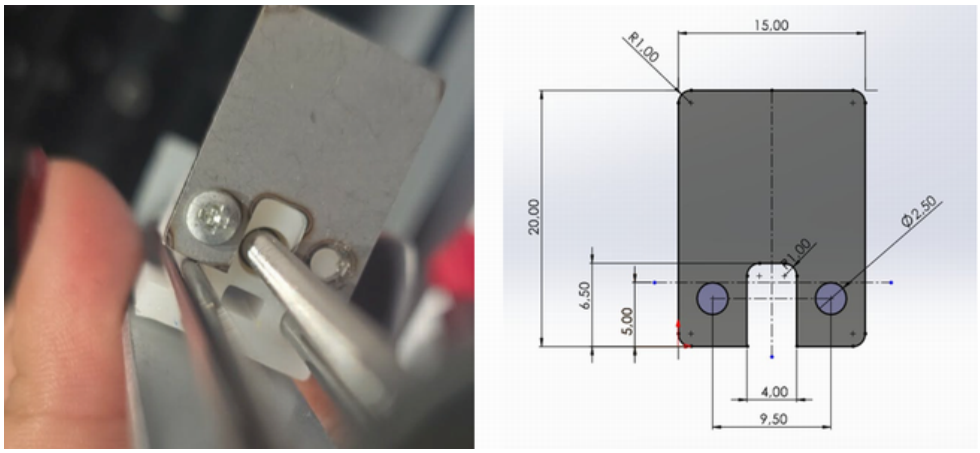


Figure II.8 – Les sillets en inox

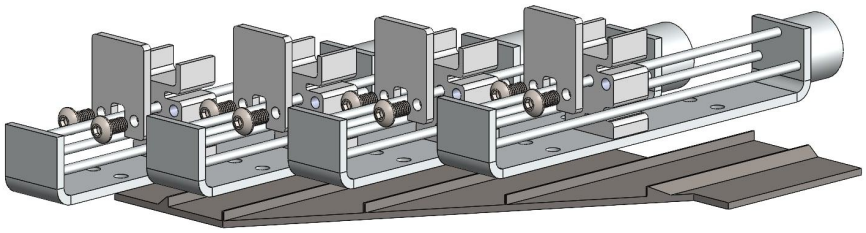


Figure II.9 – Conception du montage des sillets en inox

II.4 Instalation et programmation Arduino

II.4.1 Les équipements électroniques

II.4.1.1 La carte Arduino Uno R3

La carte Arduino Uno R3 [27] est une plateforme de prototypage embarqué fonctionnant sous 5 V, alimentable par USB ou par une source externe (7-12 V). Elle dispose de 14 entrées/sorties numériques et de 6 entrées analogiques. Cette combinaison offre une interface hybride entre le monde physique analogique et le traitement numérique, adaptée au pilotage d'actionneurs, à l'acquisition de données et au prototypage de systèmes interactifs. Dans l'installation, cette interface est entièrement exploitée pour le pilotage des quatre actionneurs linéaires. Les quatre boutons-poussoirs de commande sont connectés en entrée aux broches D12, D13, A0 et A1. Les signaux de commande des quatre moteurs

pas-à-pas sont répartis en sortie sur les douze broches numériques D0 à D11 ainsi que sur les broches analogiques A2 à A5. Cette répartition permet d'utiliser l'ensemble des capacités d'entrées/sorties de la carte, justifiant ainsi le choix de cette carte arduino Uno R3 pour notre installation.

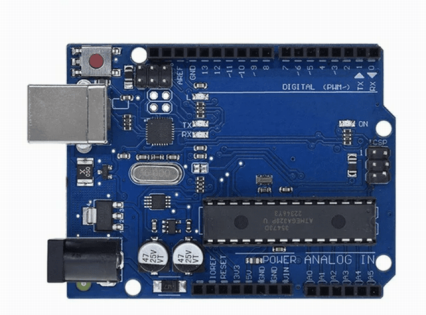


Figure II.10 – La carte Arduino Uno R3

II.4.1.2 Driver du moteur pas à pas

Le module L298N [28] est un pilote de puissance destiné au contrôle des moteurs pas à pas. Compatible avec les signaux TTL/CMOS (Arduino, Raspberry Pi, etc.), il permet de gérer le sens de rotation et la vitesse par modulation PWM. Il supporte une tension moteur de 5 V à 35 V et délivre jusqu'à 2 A par canal, avec protection par diodes de roue libre et dissipation thermique intégrée. Sa conception robuste en fait une solution adaptée aux applications de robotique mobile .

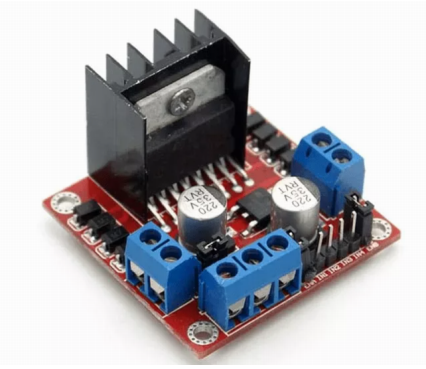


Figure II.11 – Le module de commande L298N

II.4.2 Circuit de commande

L'architecture du système de contrôle mécanique repose sur une configuration modulaire dédiée au pilotage individuel de quatre moteurs pas à pas. Le contrôle central est assuré par une carte Arduino, qui génère les signaux logiques de commande. L'alimentation du système est fournie par une source externe délivrant une tension de 9V avec une capacité de courant de 3A, paramètres dimensionnés pour couvrir les besoins en puissance simultanés des actionneurs.

L'interface de puissance entre le microcontrôleur et les moteurs est constituée de quatre modules drivers indépendants (type L298N), établissant un rapport d'un driver par moteur. La selection des maqam est réalisée à l'aide de quatre boutons poussoirs, chacun associé un maqam oriental avec un seul clic ou tubu‘ Tunisien avec un double clic. L'ensemble du système est conçu pour actionner les moteurs en même temps vers des positions bien précises et préprogrammées .

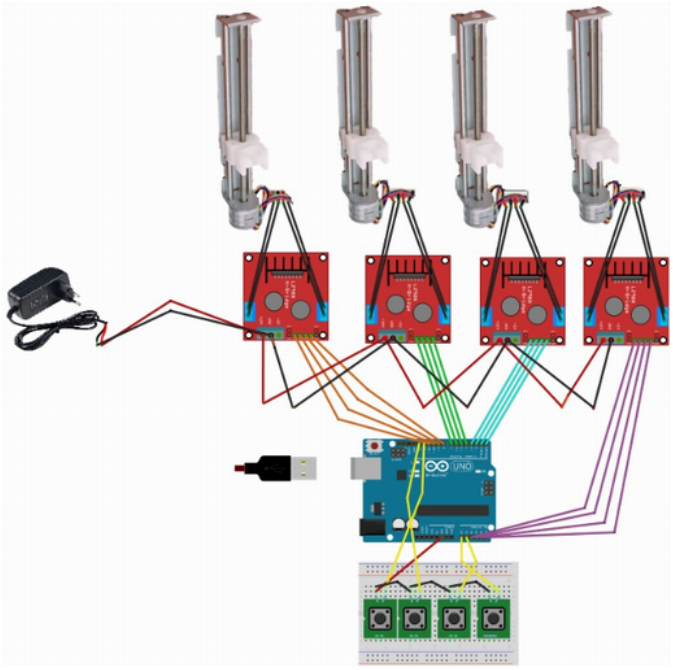


Figure II.12 – Cablage arduino-driver-moteur

II.4.3 Programmation Arduino

Cette programmation pilote un système mécanique possédant quatre moteurs pas-à-pas, spécifiquement conçu pour assurer le réglage des maqam et

des tubu‘. Chaque moteur agit indépendamment sur la longueur vibrante d’une corde, ce qui permet de générer les différents intervalles correspondants à chaque mode. Le système se pilote de manière intuitive grâce à quatre boutons poussoirs, chacun étant capable de distinguer entre un clic simple et un clic double pour les différentes configurations. On va détailler chaque fonction de la programmation.

II.4.3.1 Explication des bibliothèques incluses dans le programme Arduino

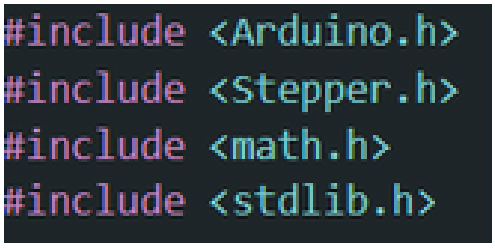


Figure II.13 – Bibliothèque principale de l’arduino

Le programme utilise plusieurs bibliothèques : la bibliothèque de base Arduino.h (obligatoire), Stepper.h pour le contrôle des moteurs pas à pas, math.h pour la fonction d’arrondi lroundf(), et stdlib.h pour la fonction valeur absolue abs(), essentielle aux déplacements simultanés.

II.4.3.2 Configuration des moteurs pas-à-pas

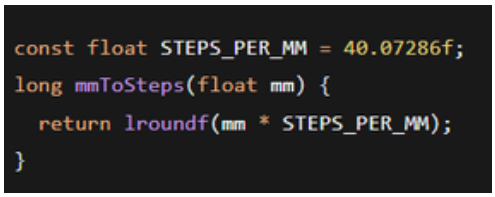


Figure II.14 – Configuration des moteurs pas-à-pas

Dans notre projet, le déplacement des sillets est piloté en millimètres pour les positionner avec précision au niveau des positions bien determinées pour chaaque maqam. Ceci nécessite deux paramètres essentiels : le STEPS-PER-MM, qui définit le nombre de pas moteur nécessaires pour parcourir 1 mm et dépend du moteur et du système vis-ecrou. La fonction mmToSteps() convertit les distance (en millimètres) en nombre de pas entier à envoyer au moteur.

Pour faire le calibrage, on a initialement positionné le moteur à son extrême gauche. Ensuite, nous avons commandé un pas élémentaire, puis mesuré le déplacement linéaire correspondant à l'aide d'un pied à coulisse. Cette procédure permet de déterminer la valeur précise du pas en millimètres, établissant ainsi la relation entre le pas moteur et le déplacement linéaire réel.

II.4.3.3 Déclaration des moteurs

```
Stepper m1(200, 0, 1, 2, 3);        // M1: D0-D3
Stepper m2(200, 4, 5, 6, 7);        // M2: D4-D7
Stepper m3(200, 8, 9, 10, 11);      // M3: D8-D11
Stepper m4(200, A2, A3, A4, A5);    // M4: A2-A5
Stepper* motors[4] = {&m1, &m2, &m3, &m4};
```

Figure II.15 – Initialisation des moteurs

Chaque moteur pas-à-pas contrôlant un sillet est piloté par un objet Stepper initialisé avec 200 pas par tour (paramètre à ajuster selon le moteur réel) et ses quatre broches de commande spécifiques. Les moteurs sont organisés dans un tableau motors[4] pour un accès simplifié : M1 sur D0-D1-D2-D3, M2 sur D4-D5-D6-D7, M3 sur D8-D9-D10-D11, et M4 sur A2-A3-A4-A5.

II.4.3.4 Vitesses de déplacements des moteurs

```
const int RPM_MOVE = 200;
const int RPM_HOME = 200;
```

Figure II.16 – Vitesses de déplacements des moteurs

Dans le jeu du qanoun, la rapidité de déplacement des sillets est essentielle pour éviter tout glissando parasite sur les cordes, notamment lors des changements rapides de maqam ou lors de l'exécution d'un tubu‘ tunisien. Le musicien doit en effet modifier les accordages avec une précision et une célérité qui ne doivent pas interrompre le flux musical. Pour répondre à cette exigence, et aprés essais avec l'artiste Hend Zouari les vitesses de moteur sont définies comme suit : RPM-MOVE pour le déplacement normal est réglée sur 200 tours/minute, tandis que RPM-HOME, utilisée pendant la procédure de retour à la position

d'origine (homing), est également fixée à 200 tours/minute. Cette configuration garantit que les plectres se repositionnent de manière quasi instantanée, permettant au quanouniste de poursuivre son jeu sans délai perceptible.

II.4.3.5 Technique de remise à zéro des moteurs

```
const float TRAVEL_MM = 80.0f;
const float HOME_MAX_PUSH_MM = TRAVEL_MM + 5.0f;
const int   HOME_BURST_STEPS = 20;
const int   HOME_BURST_DELAY_MS = 20;
const float HOME_BACKOFF_MM = 2.0f;
```

Figure II.17 – Paramètres du Homing

Les moteurs utilisés ne disposant pas de capteur de position, la procédure de homing (recalage) consiste à déplacer le chariot jusqu'à ce qu'il rencontre le premier obstacle : la butée du qanoun (figure II.18) qui définit la position zéro.

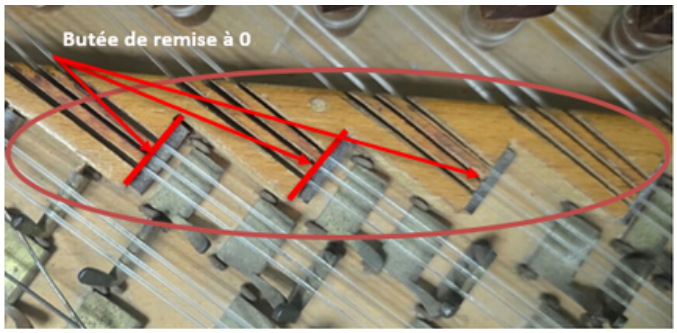


Figure II.18 – La butée du qanoun

Pour cela, le moteur avance par rafales de 20 pas (HOME-BURST-STEPS), espacées de 20 ms (HOME-BURST-DELAY-MS) afin d'éviter la surchauffe. La course utile maximale est limitée à 80 mm (TRAVEL-MM), mais en phase de recalage, le déplacement maximal autorisé est porté à 85 mm (HOME-MAX-PUSH-MM) pour garantir la sécurité. Une fois la butée détectée, le moteur effectue un léger recul de 2 mm (HOME-BACKOFF-MM) pour se dégager et éviter de rester en pression, ce qui prévient l'échauffement et évite une charge mécanique permanente(figure II.17). Aprés chaque deplacement l'excitation des bobines est désactivé afin d'éviter le surrchauffe .

II.4.3.6 Cablage des boutons

```
const int BTN_PINS[4] = {12, 13, A1, A0};
```

Figure II.19 – Broches des boutons

Le Bouton 1 est connecté à la broche numérique D12, le Bouton 2 à D13, le Bouton 3 à l'entrée analogique A1, et le Bouton 4 à l'entrée analogique A0.

II.4.3.7 Gestion des déplacements des sillets

```
const float TARGETS_SINGLE[4][4] = {
  {31.22, 16.18, 26.82, 26.82}, //
  {31.22, 30,  26.82, 26.82}, //
  {31.22, 3.00,  53.33, 26.82}, //
  {31.22, 30.00, 39.60, 26.82}  //
};

const float TARGETS_DOUBLE[4][4] = {
  {31.22, 21, 26.82, 26.82},
  {31.22, 25,  21, 26.82},
  {31.22, 8,  48, 26.82},
  {31.22, 30.00, 48, 26.82}
};
```

Figure II.20 – Déplacement pour les maqam et les tubu‘

Sur la (figure II.20) est presenté la fonction qui gére les valeurs numériques définissant précisément le déplacement physique, en millimètres, de chaque plectre ou médiateur actionné individuellement, déterminant ainsi la hauteur de la note jouée. Dans le contexte spécifique de l'adaptation aux systèmes musicaux modaux, ces distances sont méticuleusement calculées pour permettre l'exécution des intervalles caractéristiques des maqam arabes et du répertoire de la musique tunisienne, notamment le Tubu‘.

II.4.3.8 Détection du clic ou double clics

```
unsigned long lastClickTime[4] = {0};
int clickCount[4] = {0};
const unsigned long DOUBLE_CLICK_DELAY = 350;
```

Figure II.21 – Variables pour détection des clics

En l'absence de entré libre sur la carte Arduino, cette méthode exploite les mêmes boutons pour deux actions distinctes (clic simple = maqam, double-clic

= tubu‘ Tunisien) grâce à la gestion logicielle de l’état des boutons. Le compteur clickCount[i] enregistre le nombre de pressions successives, tandis que lastClickTime[i] mémorise le moment du dernier appui. La constante DOUBLE-CLICK-DELAY, fixée à 350 ms, définit la fenêtre temporelle maximale entre deux clics pour qu’ils soient considérés comme un double-clic. Ainsi, si un deuxième clic est détecté avant l’expiration de ce délai, le système déclenche l’action de double-clic (tubu‘ Tunisien) ; sinon, il exécute l’action de clic simple (maqam).

II.4.3.9 Fonction : déconnection des bobines

```
void releaseAllCoils() {
  // Met toutes les broches moteurs à LOW → coupe le courant
  // Ne touche PAS à A0/A1 (réservées aux boutons)
}
```

Figure II.22 – Fonction : déconnection des bobines

Entre les mouvements, cette fonction permet d’éviter l’échauffement des moteurs au repos et libère leur bobine électrique. Elle préserve les broches A0/A1 en mode entrée, laissant ainsi les boutons pleinement opérationnels.

II.4.3.10 Fonction : déplacement simultané

```
void moveMotorsTo(const float targets[4]) { ... }
```

Figure II.23 – Fonction : déplacement simultané

Pour chaque maqam ou tubu‘ Tunisien, un plectre est assigné à un moteur pas-à-pas. Le système prend un tableau de 4 distances (en mm), calcule le nombre de pas nécessaire pour chaque moteur, puis fait avancer tous les moteurs en même temps et sans delay entre chaque pas. Grâce à cette synchronisation fluide et sans delay(), les 4 plectres se déplacent visuellement de manière simultanée, préservant ainsi la justesse rythmique et mélodique du jeu traditionnel.

Cette fonction s’affranchit de l’exécution séquentielle traditionnelle, qui ne déplacerait qu’un seul moteur à la fois.

II.5 Conclusion

Ce chapitre a été celui de la conception et réalisation du systéme. on a passés de l'analyse à l'action, en concevant et en réalisant un prototype fonctionnel d'un système automatisé à quatre actionneurs. L'analyse comparative a validé le choix du moteur pas-à-pas pour sa précision et son contrôle fin, tandis que la conception modulaire du support a répondu au défi de l'intégration mécanique sur un instrument délicat. La programmation Arduino a concrétisé l'interface de contrôle, permettant de passer d'un mode à un autre par simple pression sur un bouton. Cependant, la construction d'un système fonctionnel n'est qu'une première étape. Une question essentielle demeure : ce système mécanique est-il musicalement acceptable ? Préserve-t-il l'intégrité acoustique du qanoun, ou altère-t-il son timbre de façon rédhibitoire ? Le chapitre suivant quitte donc le domaine de la conception pour celui de la validation scientifique et musicale. On y déploierons une méthodologie expérimentale rigoureuse pour mesurer, comparer et analyser les caractéristiques sonores du qanoun à sillets manuels et du qanoun à actionnement motorisé, afin d'évaluer objectivement l'impact de notre augmentation sur l'identité sonore de l'instrument.

Chapitre III
Mesures et résultats

III.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif central d'évaluer la performance non plus sous l'angle technique, mais sous l'angle acoustique et musical. Il ne suffit pas que le système fonctionne ; il doit produire un son de qualité, préserver la richesse harmonique du qanoun et valider la justesse des micro-intervalles produits. on a donc mettre en place une méthodologie expérimentale complète pour comparer scientifiquement le son généré par les sillets manuels et celui généré par notre système automatisé. On a décrir d'abord le protocole de prise de son en environnement contrôlé, utilisant un microphone de mesure et une interface audio professionnelle. Ensuite, on a présente le cœur de notre méthode : une analyse logicielle (via MATLAB) permettant de traiter les signaux enregistrés, de les synchroniser, et d'en extraire des métriques comparatives clés (spectres de fréquence, spectrogrammes, fondamentales). Enfin, on applique cette méthodologie aux notes selectionnée (Ré, Mi, Fa, Sol) pour quatre maqam et quatre tubu‘.

III.2 Les mesures de l'emplacement des sillets

Pour garantir un positionnement précis et fiable de chaque sillet, un pied à coulisse est utilisé, afin de mesurer les distances en millimètres de manière rigoureuse. Grâce à cet instrument de mesure, les positions de chaque sillet sont ainsi définies et toujours reproduites avec soin au regard des exigences spécifiques de quatre maqam et de quatre tubu‘.

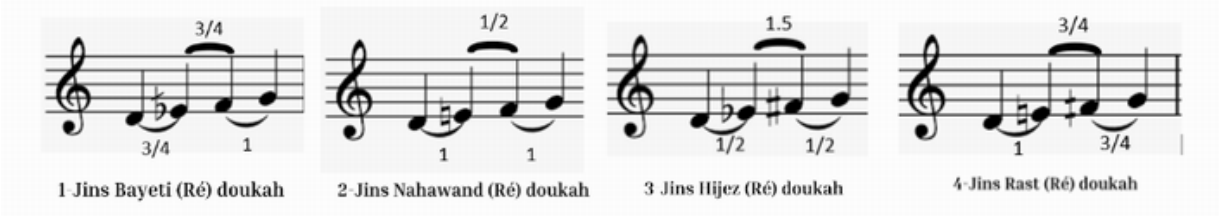


Figure III.1 – Les jins étudiés

Bouton	Les ajnas de maqam	M1(D) (mm)	M2(E) (mm)	M3(F) (mm)	M4(G) (mm)
Bouton 1	بياتي (Bayeti)	31,22	16,18	26,82	26,82
Bouton 2	نهاوند (Nahawand)	31,22	30,00	26,82	26,82
Bouton 3	حجاز (Hijaz)	31,22	30,00	53,35	26,82
Bouton 4	راست (Rast)	31,22	30,00	39,60	26,82

Table III.1 – Positionnement des sillets selon les ajnes de maqam

L'accord du qanoun pour les micro-intervalles selon les spécificités des tubu‘ tunisiennes repose sur une démarche comparative et validée par par l'expertise sensorielle de musiciens réputés, notamment Mme.Hend Zouari, M.Hilel Ben Amor[1] et M.Lasaad Haddar[2].

Bouton	Les ajnas de Tubu‘	M1(D) (mm)	M2(E) (mm)	M3(F) (mm)	M4(G) (mm)
Bouton 1	الحسين (Hssin)	31,22	21	26,82	26,82
Bouton 2	محير سيكاه (Mhayer Sikah)	31,22	25	21	26,82
Bouton 3	اصبعين (Isbaayn)	31,22	8	48	26,82
Bouton 4	الذيل (ALdhil)	31,22	30	48	26,82

Table III.2 – Positionnement des sillets selon les ajnes de Tubu‘ Tunisien

Les tableaux 3.1 (Maqam) et 3.2 (Tubu‘) illustrent une configuration des sillets où les moteurs M1 (D) et M4 (G) présentent des positions fixes (respec-

1. Hilel Ben Amor, violoniste, musicien et chef d'orchestre tunisien, docteur et professeur à l'Institut supérieur de musique de Sfax.

2. Lassaad Haddar, musicien et professeur à l'Institut Supérieur de Musique de Sfax.

tivement 31,22 mm et 26,82 mm) pour tous les boutons, garantissant une base tonale stable. Au contraire, des ajustements fins sont observés au niveau des moteurs M2 (E) et M3 (F) selon le mode sélectionné. Pour les Maqam (Tableau 3.1), les variations de M2 et M3 restent limitées. Dans le cas des Tubu‘ (Tableau 3.2), les modifications de M2 et M3 sont plus marquées et systématiques, reflétant des micro-intervalles spécifiques aux pratiques tunisiennes. Le positionnement précis des plectres pour les Tubu‘ a été validé par une expertise musicologique sensorielle, assurant ainsi une correspondance fidèle aux exigences mélodiques et intonationnelles des traditions concernées.

III.3 Timbre du qanoun avec le nouveau système

Pour garantir l'objectivité et la reproductibilité de l'analyse comparative des signatures sonores d'un qanoun à sillet manuels et d'un qanoun à actionnement motorisé, une méthodologie de mesure experimentale a été mise en œuvre.

III.3.1 Microphone de mesure Behringer ECM 8000

Le choix s'est porté sur un transducteur de référence dédié aux mesures : le microphone à condensateur de mesure Behringer ECM 8000[29]. Cette sélection est motivée par ses spécifications métrologiques, cruciales pour une acquisition neutre. Sa réponse en fréquence nominalement plate (±2 dB, 20 Hz – 20 kHz) et son diagramme polaire parfaitement omnidirectionnel minimisent les artefacts de coloration et les variations de réponse angulaire, assurant ainsi une représentation fidèle du champ acoustique rayonné par chaque instrument, indépendamment de leur directivité résiduelle. La haute résolution temporelle et spectrale de ce capteur permet de quantifier précisément les paramètres pertinents pour la comparaison, tels que l'enveloppe temporelle (attaque, sustain, décroissance), la répartition spectrale (contenu harmonique et inharmonicité) et la réponse impulsionnelle globale de chaque système. L'ensemble des acquisitions a été réalisé en condition d'alimentation fantôme normalisée (+48 V), dans un environnement acoustique contrôlé (Studio d'enregistrement), avec une géométrie source-microphone reproductible, validant ainsi la base comparative des données enregistrées.

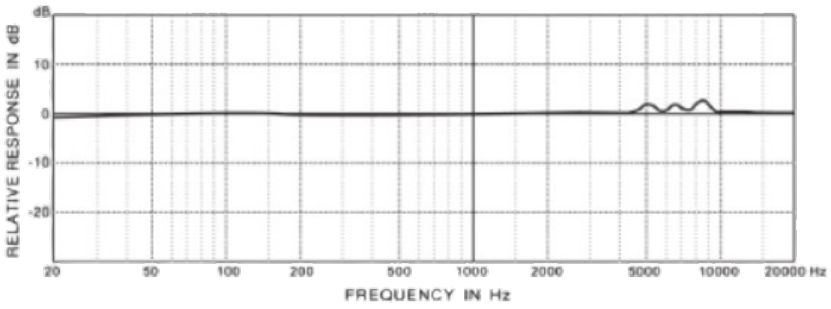


Figure III.2 – Plage fréquentielle du microphone de mesure Behringer ECM 8000

III.3.2 La carte son M-Track Solo

Pour la prise de son nous avons utulisé la carte son M-Track Solo[30]. Cette interface audio USB, compatible Mac et PC, offre une résolution de 48 kHz pour des enregistrements de qualité. Elle dispose d'une entrée combo XLR/Jack avec alimentation fantôme (+48V) pour micros et instruments.

Un préamplificateur de type "Crystal" optimise le gain d'entrée, garantissant un rapport signal/bruit élevé et une reproduction précise, particulièrement adaptée aux micros à condensateur. Pour le monitoring, l'interface propose une sortie casque 3.5 mm et des sorties stéréo RCA, tandis qu'un commutateur USB/Direct permet une écoute en temps réel sans latence, essentielle lors des prises de son ou du streaming en direct.



Figure III.3 – La carte son M-Track Solo

Lors de la prise de son, le microphone est positionné sur la caisse de résonance du qanoun. Son emplacement est rigoureusement conservé à l'identique pour les deux expériences.

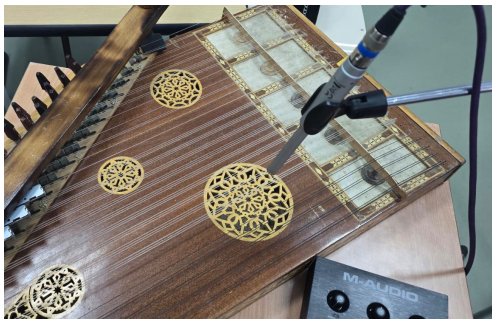


Figure III.4 – Instalation pour prise de son

Garantissant ainsi des conditions d'acquisition sonore constantes et permettant une comparaison fiable des résultats.



Figure III.5 – Prise de son d'un qanoun au sillets manuels et ceux automatisés

III.4 Les résultats obtenus

Pour exclure les aléas expérimentaux, chaque note est répétée trois fois avec le système traditionnel et trois fois avec le nouveau système .

Après l'acquisition sonore, les données enregistrées sont traitées et analysées dans MATLAB. Une fonction dédiée est conçue pour comparer les signaux audio d'une même note musicale, avant et après modification. Elle prend en entrée les six fichiers audio (Trois essais du système traditionnel et trois essais du système nouveau pour chaque note), les prétraite, analyse leurs caractéristiques spectrales et temporelles, puis détermine la meilleure correspondance par corrélation croisée entre les versions d'origine et les versions modifiées. Enfin, elle génère un rapport complet, à la fois visuel et numérique, résumant les écarts et les similitudes mesurés.

III.4.1 Les résultats obtenus pour la note RE(D)

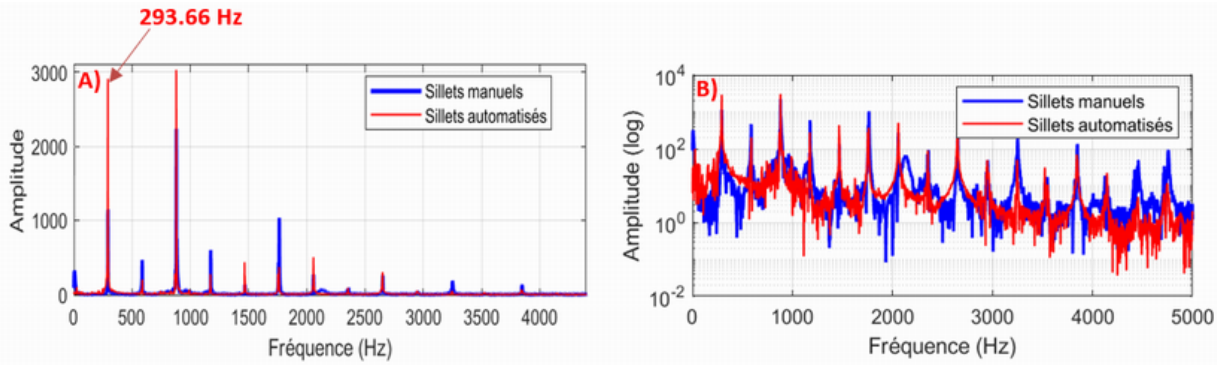


Figure III.6 – Spectre sillets manuels / automatisés pour la note RE (D)

Sur ce graphique (figure III.6 (A)) (Amplitude Linéaire), on observe que pour la fréquence fondamentale à 293,66 Hz, les sillets automatisés présentent une amplitude plus élevée, ce qui traduit une note fondamentale plus "riche" ou dominante dès l'attaque. En comparaison, les sillets manuels affichent une amplitude de la fondamentale presque similaire, mais se situe légèrement en retrait (plus bas). Cette légère différence suggère que le mécanisme automatisé favorise une transmission initiale de l'énergie plus directe sur la fréquence de base.

L'échelle logarithmique (figure III.6 (B)) permet d'approfondir l'étude de la structure harmonique. Nous avons remarqué, bien que la fondamentale soit plus riche pour les sillets automatisés, les sillets manuels maintiennent une présence plus constante et parfois plus élevée sur certains harmoniques de rang supérieur (notamment entre 3000 Hz et 5000 Hz). La courbe (B) révèle également un "plancher de bruit" et des résonances intermédiaires plus marqués pour les sillets manuels, ce qui pourrait se traduire par un timbre plus complexe et une texture sonore plus dense malgré une fondamentale légèrement moins puissante.

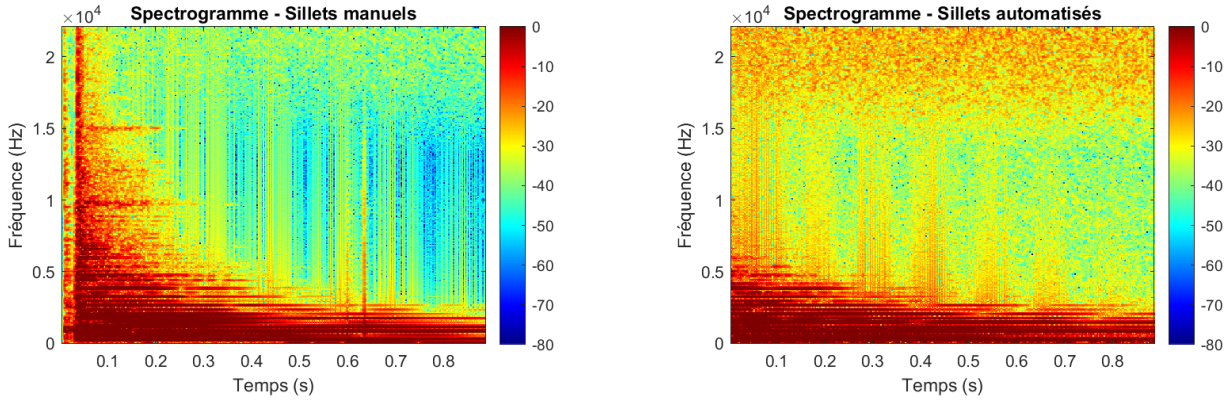


Figure III.7 – Spectrogramme sillets manuels et sillets automatisés pour la note RE(D)

L'examen des propriétés spectrales de la note Ré (D) permet de distinguer des comportements vibratoires spécifiques selon le type de sillet utilisé, mettant en évidence des variations de richesse harmonique et de dynamique (figure III.7).

Sillets Manuels : Ils affichent une concentration d'énergie (zone rouge sombre) beaucoup plus persistante dans les basses fréquences (0 à 0,5 10^4 Hz) au-delà de 0,4 seconde. La texture visuelle est plus "pleine", ce qui indique un sustain supérieur et une richesse spectrale qui ne s'effondre pas immédiatement après l'attaque.

Sillets Automatisés : Bien que l'attaque initiale soit puissante (rouge vif au départ), l'énergie se dissipe plus rapidement. On observe une transition vers le jaune et le vert (intensités moindres) plus précoce, ce qui confirme que la "richesse" de la fondamentale observée sur la courbe A est intense mais de plus courte durée par rapport au sillet manuel.

III.4.2 Les résultat obtenus pour la note MI(E)

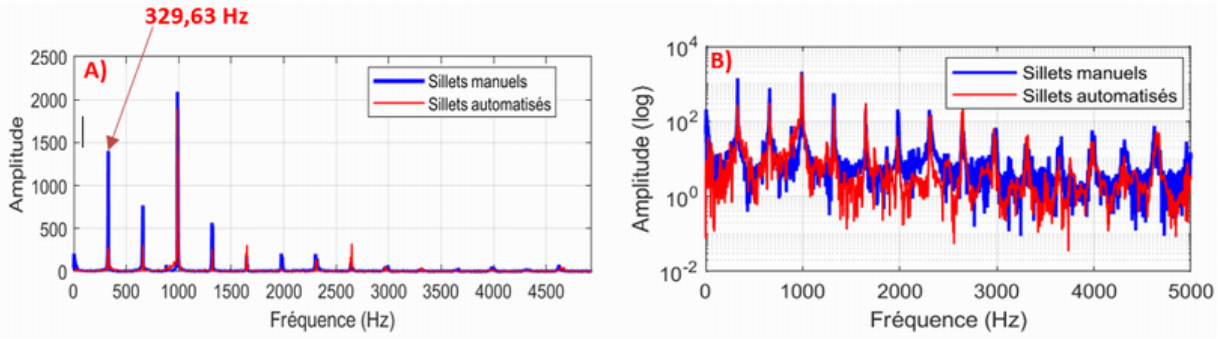


Figure III.8 – Spectre sillets manuels / automatisés pour la note Mi (E)

L'analyse spectrale de la note Mi (E), dont la fréquence fondamentale est identifiée à 329,63 Hz (figure III.8), révèle des différences légère dans la réponse acoustique selon le type de sillet utilisé.

Sur cette courbe (figure III.8 (A)), on observe que les sillets manuelles présentent une amplitude plus élevée pour la fréquence fondamentale par rapport aux sillets automatisés. À l'inverse, l'amplitude du sillets automatisés restent presque identique en termes de position fréquentielle, mais se situe à un niveau légèrement inférieur (plus bas), indiquant une légère atténuation de la puissance de la note de base.

L'utilisation d'une échelle logarithmique (figure III.8 (B)) permet de mieux visualiser la distribution des harmoniques et le rapport signal/bruit. On constate que malgré la domination de la fondamentale chez le sillet manuel dans le graphique (A), les sillets automatisés montre une présence très marquée sur certains harmoniques de rang élevé (notamment autour de 1500-2000 Hz). La courbe (B) confirme que la structure harmonique globale reste cohérente entre les deux technologies.

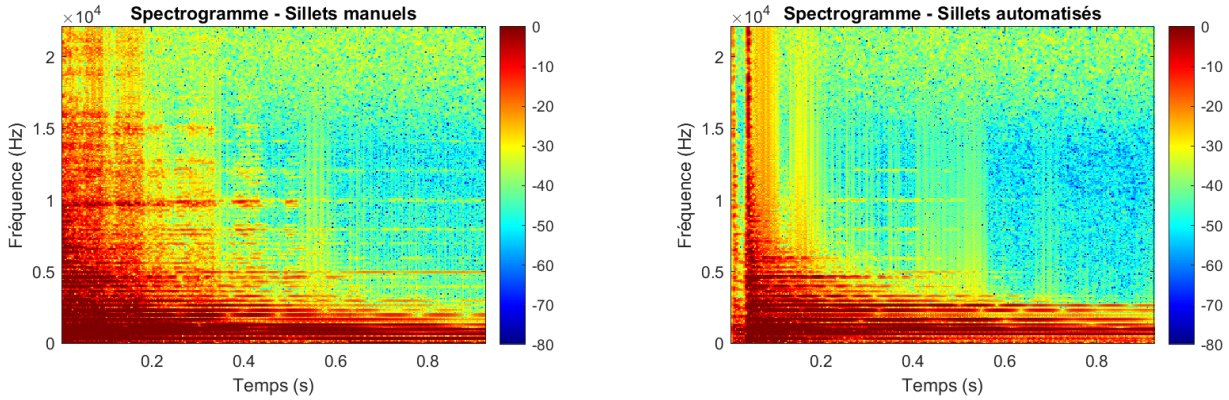


Figure III.9 – Spectrogramme sillets manuels et sillets automatisés pour la note MI(E)

L'analyse des spectrogrammes (figure III.9) révèle que les sillets manuels se distinguent par une densité spectrale supérieure. En termes de richesse harmonique, les zones de forte intensité (rouge et orangé) s'étendent verticalement de manière significative, dépassant le seuil des 1×10^4 Hz dès l'attaque de la note, ce qui confère à l'instrument une brillance grâce à cette présence étendue des hautes fréquences. Par ailleurs, l'étude du sustain et de la résonance montre une zone entre 0,2 s et 0,5 s particulièrement saturée, témoignant d'une transmission complexe des vibrations où les harmoniques conservent des couleurs «chaudes» sur une durée prolongée.

L'analyse des spectrogrammes démontre : bien que la structure harmonique globale ne présente pas de divergence majeure entre les deux technologies, les sillets automatisés se distinguent par une décroissance énergétique plus rapide s'estompent prématurément vers le bleu après seulement 0,6 seconde, contrairement au modèle manuel. Dans les hautes fréquences, on observe une diminution marquée de l'intensité sonore.

III.4.3 Les résultat obtenus pour la note FA(F)

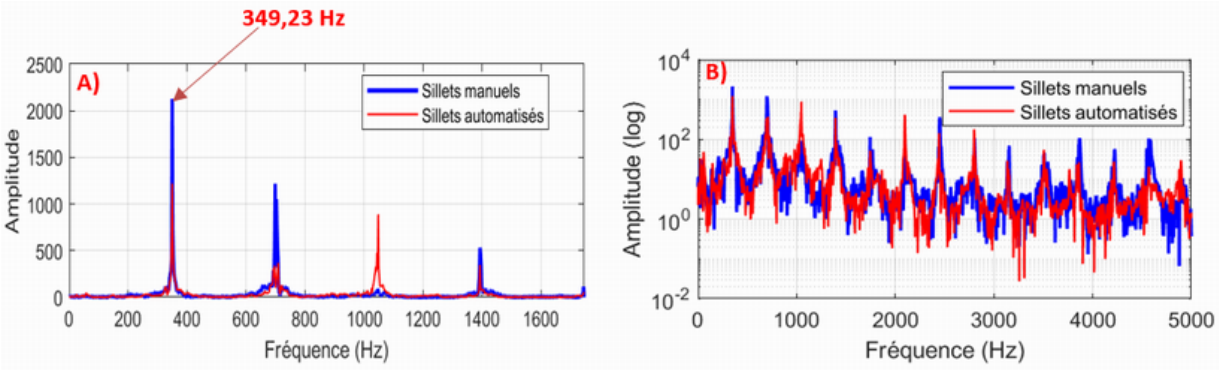


Figure III.10 – Spectre sillets manuels / automatisés pour la note Fa (F)

Sur la Courbe A (Amplitude Linéaire) (figure III.10 (A)) : on observe que la fréquence fondamentale à 349,23 Hz. Les sillets manuels présentent une note fondamentale riche et plus haute en termes d'amplitude, atteignant un pic supérieur à 2000 unités. En contrepartie, l'amplitude du sillets automatisés sont presque identique en termes de précision fréquentielle, mais se situe un peu plus bas, indiquant une légère perte de puissance sur l'onde porteuse principale de la note Fa.

Le passage à une échelle logarithmique (figure III.10 (B)) permet d'analyser la structure harmonique fine sur une plage plus large (jusqu'à 5000 Hz). On constate que les sillets manuels maintiennent une supériorité d'amplitude non seulement sur la fondamentale, mais également sur le deuxième harmonique (environ 700 Hz). Cependant, les sillets automatisés montrent des pics d'amplitude très marqués et parfois supérieurs sur certains harmoniques de rang plus élevé (notamment autour de 1100 Hz et 2200 Hz). Cela indique que si le sillet automatisé est moins puissant sur la base de la note.

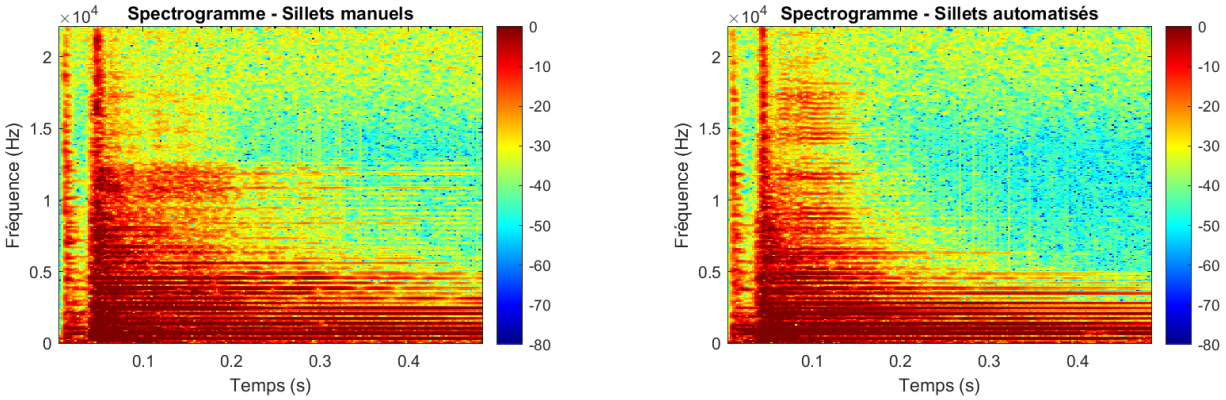


Figure III.11 – Spectrogramme sillets manuels et sillets automatisés pour la note FA(F)

Sillets Manuels : Le spectrogramme des sillets manuels (figure III.11)montre une densité d'énergie très élevée (matérialisée par des zones rouge foncé) qui s'étend de manière persistante sur les premières 0,4 secondes, particulièrement dans la plage des basses fréquences (en dessous de $0,5 \times 10^4$ Hz). On note également une présence d'harmoniques plus marquée et plus longue, ce qui confirme un sustain plus robuste et une richesse harmonique globale supérieure.

Sillets Automatisés : Pour les sillets automatisés, bien que l'attaque initiale soit intense, on observe une décroissance énergétique plus rapide. Les zones de haute intensité (rouge) s'estompent plus vite vers le jaune et le vert après 0,2 seconde.

III.4.4 Les résultat obtenus pour la note SOL(G)

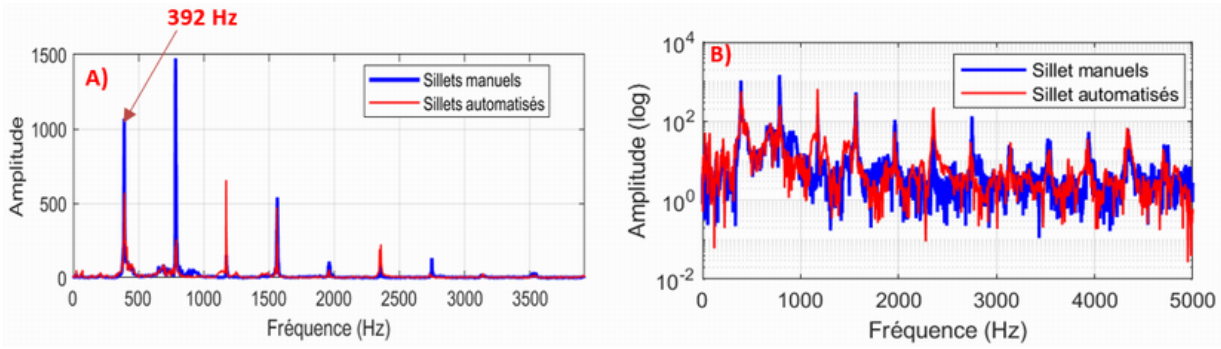


Figure III.12 – Spectre sillets manuels / automatisés pour la note Sol (G)

Sur la Courbe A (figure III.12 (A)) (Amplitude Linéaire) : Pour la fréquence fondamentale située à 392 Hz, on observe que les sillets manuels gé-

nèrent une note fondamentale plus riche et plus haute, avec un pic d'amplitude dépassant nettement les 1000 unités. En comparaison, l'amplitude du sillets automatisés sont presque la même en termes de position, mais elle se situe un peu plus bas.

L'examen en échelle logarithmique (figure III.12 (B)) permet de visualiser la richesse harmonique globale. Bien que les sillets manuels domines les premières fréquences, la courbe (B) révèle que les sillets automatisés présente des pics d'amplitude très pointus sur certains harmoniques supérieurs (notamment autour de 1200 Hz et 2400 Hz). Cela indique que les sillets automatisés, bien que moins puissant sur la note fondamentale, favorise une brillance spécifique dans les hautes fréquences.

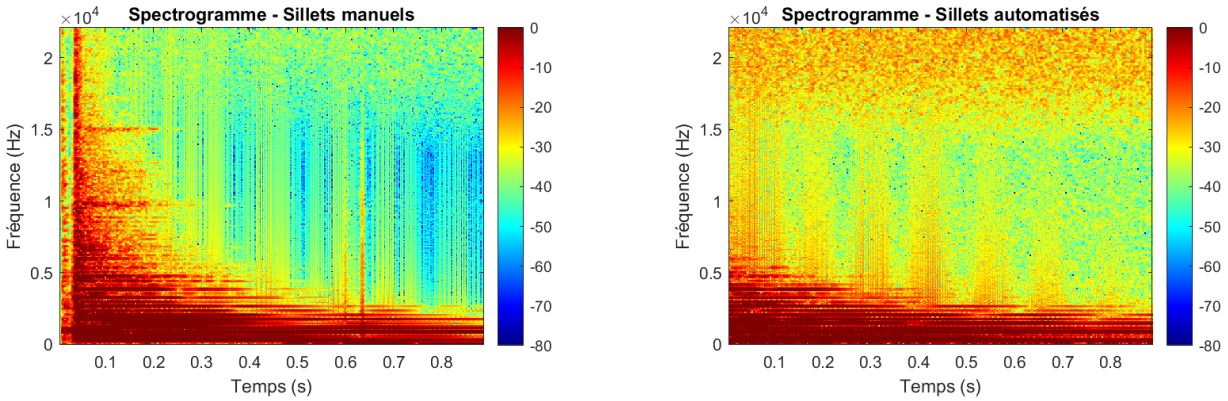


Figure III.13 – Spectrogramme sillets manuels et sillets automatisés pour la note SOL(G)

Sillets Manuels : Le spectrogramme associé aux sillets manuels (figure III.13) montre une densité énergétique nettement plus importante. Les zones de forte intensité (rouge foncé) sont plus larges et persistent plus longtemps, particulièrement dans les fréquences fondamentales et les premiers harmoniques (en dessous de 0.5×10^4 Hz). Cette signature visuelle se traduisant par un sustain plus long et une résonance plus profonde.

Sillets Automatisés : Pour les sillets automatisés, on observe une dissipation d'énergie plus rapide. Bien que l'attaque initiale soit visible, les bandes horizontales représentant les harmoniques s'éclaircissent (passant du rouge au jaune/vert) beaucoup plus tôt que sur le modèle manuel. La surface "chaude" du spectrogramme est plus réduite, ce qui confirme que la richesse de la fondamen-

tale, bien que présente, s'atténue plus promptement.

III.5 Analyse finale des résultats

L'analyse globale des données acoustiques pour l'ensemble des notes étudiées Ré (293,66 Hz), Mi (329,63 Hz), Fa (349,23 Hz) et Sol (392 Hz) révéle des profils spectraux et temporels presque identiques, suggérant que les deux technologies de sillets assurent une fonction vibratoire fondamentalement équivalente.

Les légères divergences observées, notamment une dissipation énergétique plus rapide dans les hautes fréquences pour les sillets automatisés, ces variations n'indiquent pas une altération du système, mais s'expliquent par des variables physiques inhérentes au protocole expérimental. Ces nuances s'expliquent principalement par l'utilisation de l'acier inox pour les nouveaux sillets, ainsi que par d'inévitables variations de pression sur les cordes ou de force d'attaque du musicien lors des enregistrements.

En définitive, malgré ces modifications mineures liées au matériau et aux conditions expérimentales, les deux systèmes produisent une signature sonore globalement homogène.

III.6 Conclusion

Ce chapitre a apporté une réponse quantitative et comparée à la problématique de la validité sonore du système automatisé par rapport à la pratique traditionnelle. L'analyse acoustique menée sur quatre notes fondamentales Ré (D), Mi (E), Fa (F) et Sol (G) a révélé une structure harmonique globalement préservée.

Ces résultats permettent de conclure que l'automatisation proposée est capable de générer une émission sonore musicalement acceptable, tout en pointant des pistes d'amélioration concernant les matériaux et le contrôle dynamique. Ils constituent une base objective pour la réflexion finale sur l'intégration artistique et technique du « qanoun augmenté ».

Conclusion

Ce mémoire s'est inscrit dans une démarche à la fois organologique, technologique et musicologique, visant à interroger les limites expressives du qanoun traditionnel et à y apporter une réponse concrète, reproductible et musicalement acceptable. En partant d'une analyse approfondie de l'histoire de l'instrument, de son fonctionnement acoustique et des contraintes mécaniques imposées par son système de sillets manuels, nous avons démontré que la modulation modale en temps réel constitue un obstacle gestuellement coûteux pour le qanouniste : la main gauche, détournée de son rôle musical, est mobilisée par une tâche mécanique répétitive qui réduit la fluidité expressive, limite la simultanéité des hauteurs et contraint l'improvisation. C'est dans cette tension entre richesse du patrimoine musical et rigidité organologique que s'est construit notre projet, avec un objectif clairement délimité : non pas transformer l'identité sonore du qanoun, mais prolonger ses possibilités par une augmentation technologique respectueuse de sa logique musicale et de son timbre.

La contribution principale de ce travail réside dans le passage décisif d'une preuve de concept mono-note, antérieurement développée par M.Chouvel, Mme.Zouari, M.Quartier et M.Fabre (2022), vers un système automatisé multi-notes capable de contrôler simultanément quatre sillets. L'analyse comparative de trois solutions techniques système à cames, mini solénoïde électrique linéaire et moteur pas-à-pas linéaire a mis en évidence les limites respectives de chaque approche : le système à cames, bien que précis et durable, ne permet pas d'ajuster finement le profil du mouvement sans reconstruction mécanique ; le mini solénoïde, quant à lui, présente une insuffisance structurelle de pression de contact, incompatible avec le basculement fiable d'un sillet, ainsi qu'une dissipation thermique excessive lors d'un maintien prolongé sous tension. Le choix du moteur pas-à-pas linéaire, retenu après cette évaluation comparative, a permis

d'atteindre une résolution de positionnement de 0,025 mm par pas, très largement supérieure aux exigences de justesse microtonale du qanoun. La vitesse de déplacement des sillets, fixée à 200 tours par minute à l'issue d'essais réalisés avec l'artiste Hend Zouari, garantit une transition quasi instantanée entre les modes, sans rupture perceptible du flux musical pour l'interprète.

Sur le plan de l'intégration mécanique, la conception itérative du support passant d'une première version en tôle trop flexible, à une seconde version en bois insuffisamment réglable, jusqu'à une troisième solution modulaire intégrant pinces de montage, axe de réglage et pièce d'alignement imprimée en 3D illustre une démarche d'ingénierie rigoureuse, fondée sur l'identification empirique des défauts et leur correction progressive. Cette approche a permis d'aboutir à un système à la fois stable, réglable et respectueux de l'intégrité physique de l'instrument, condition indispensable à tout projet d'augmentation d'un instrument patrimonial.

Sur le plan acoustique, l'analyse spectrale et les spectrogrammes comparatifs menés sur les quatre notes cibles (Ré (293,66 Hz), Mi (329,63 Hz), Fa (349,23 Hz) et Sol (392 Hz))ont démontré que la structure harmonique fondamentale du qanoun est globalement préservée par le système automatisé. Les profils spectraux obtenus avec les sillets manuels et avec les sillets motorisés demeurent, pour chacune des quatre notes, très proches en position fréquentielle et en répartition harmonique générale. Les différences mesurées, notamment une dissipation énergétique légèrement plus rapide dans les hautes fréquences avec les sillets en inox, ainsi qu'une décroissance temporelle plus marquée observée sur les spectrogrammes, s'expliquent par plusieurs paramètres physiques liés au protocole expérimental variations de pression de contact, de force d'attaque du musicien et aux propriétés intrinsèques du matériau métallique utilisé pour les nouveaux sillets, plutôt que par une altération structurelle du système d'actionnement. Ces résultats confirment ainsi la viabilité musicale de l'approche proposée, sans pour autant clore la question de l'optimisation du matériau de contact.

Ce travail présente néanmoins certaines limites qu'il convient de souligner avec la même rigueur que celle appliquée à l'évaluation des résultats positifs. Premièrement, le prototype actuel fonctionne en boucle ouverte : en l'absence

de capteurs de position sur les moteurs, le recalage repose sur une procédure de butée mécanique (homing), rendant le système sensible aux pertes de pas lors de charges excessives, notamment en cas de frottement inhabituel d'une corde. Deuxièmement, les éléments de contact métalliques utilisés pour le déplacement des sillets entraînent une légère homogénéisation du timbre, réduisant partiellement la richesse harmonique dans le registre des fréquences supérieures, comme l'ont révélé les spectrogrammes comparatifs. Troisièmement, le système reste actuellement limité à quatre cordes parmi les vingt-quatre à vingt-sept cours que compte le qanoun, ce qui restreint la liberté modale à un seul jins par configuration, et ne permet pas encore de couvrir l'intégralité du système modal maqamique ou tunisien.

Ces limites définissent précisément le programme de recherche à poursuivre. À court terme, l'intégration de capteurs de position encodeurs rotatifs ou capteurs de fin de course permettrait de faire évoluer le système vers une commande en boucle fermée, garantissant un repositionnement robuste et reproductible quel que soit l'état mécanique du dispositif, et s'affranchissant ainsi de la dépendance actuelle à la butée physique de l'instrument. À moyen terme, l'extension de l'automatisation à l'ensemble des cordes du qanoun, ou à défaut aux degrés modaux les plus sensibles du système maqam-tubu', constitue une perspective naturelle pour couvrir la richesse complète des modes orientaux et tunisiens, au-delà du seul jins de base traité dans ce mémoire. À plus long terme, l'implication de l'intelligence artificielle ouvre des horizons encore largement inexplorés dans le champ de l'instrument augmenté appliqué à la musique modale : reconnaissance automatique du maqam joué par analyse spectrale en temps réel, suggestion de modulation modale adaptative en fonction du contexte mélodique, ou encore interaction improvisée entre le qanouniste et un système d'accompagnement algorithmique au sein d'environnements tels que Djazz, développé par M.Marc.

Ces perspectives confirment que le qanoun augmenté ne se réduit pas à un simple dispositif technique achevé, mais s'inscrit comme un espace de recherche vivant, à la croisée du patrimoine musical tunisien, de la création contemporaine et des technologies numériques émergentes — un espace où l'ingénierie mécatronique se met au service de la préservation et du renouvellement d'une

tradition musicale séculaire.

Bibliographie

[1] Entretien avec Imane Homsy. *Ab initio Seigneur Kanoun*. PhD thesis, 2006. 4

[2] EMM Paris. Cours de qanoun (kanun) – professeur de qanoun – achat de qanoun turc oriental, 2024. Consulté le 16 septembre 2024. 4

[3] Musique Classique Forum. *« Le Qanun ou Kanon »*. PhD thesis, 2025. 4

[4] Ghassan Sahhab. *La cithare sur caisse, qānūn, au Proche-Orient : évolution d'un instrument de musique traditionnel au XXe siècle*. Thèse de doctorat en musicologie, Université Sorbonne Paris IV, 2021. 6, 8, 10, 13, 16

[5] Muséum national d'Histoire Naturelle – HIS-NUM / Muséonise. Roi david jouant de la cithare ; autres types de cithares ; clochette ; harpe ; flûtes ; instrument hors instrumentarium ; bombulus ; cornemuse ; autre instrument à vent ; tympanum. 6

[6] Auteur non précisé. Le kanoun : Un voyage musical traversant les millénaires, 2025. consulté le 17 septembre 2025. 11

[7] Muhammad al'Aqqad al Kabir. *Mounazzarat Ilmiyya*. 1912. 12

[8] Rodolphe d'Erlanger. *La musique arabe*. P. Geuthner, Paris, 1930. Consulté le 02 aout 2025. 13

[9] Institution non précisée. Kanun. http://www.catalhoyuk.gov.tr/FR/BelgeGoster.aspx, 2025. Consulté le 17 septembre 2025. 13

[10] Ali Jihad Racy. *Making Music in the Arab World : The Culture and Artistry of Tarab*. Cambridge University Press, Cambridge, 2003. 13, 16

[11] Hend zouari, Jean-Marc Chouvel, Laurent Quartier, Laurent Fabre, Philippe Gauthier, and Alexandre Bestandji. Le qanun augmenté : une so-

lution pour l'accord en cours de jeu d'un instrument traditionnel, 2024. Consulté en novembre 2025. 14

[12] Laurent Quartier Laurent Fabre Jean-Marc Chouvel, Hend Zouari. *Le Qanun augmenté : une solution pour l'accord en cours de jeu d'un instrument traditionnel*. PhD thesis, 2022. 14, 19

[13] Jean During. *La musique arabe*. Presses Universitaires de France, Paris, 1994. 15

[14] Scheherazade Hassan. *Les instruments de musique en Iraq et leur rôle dans la société*. Thèse de doctorat, Université Paris-Sorbonne, 2002. 15

[15] Raed Belhassen. Structures modales et ornementations dans les musiques arabes : modélisations et présentation d'une bibliothèque d'objets dans csound. PDF en ligne, 2024. CICM - Centre de recherche en Informatique et Création Musicale, Université Paris 8. 17, 18

[16] Hend Zouari. *Les ornementations dans le tba' rast el dhil : l'exemple du Congrès du Caire de 1932*. Thèse, Université Paris-Sorbonne, décembre 2012. Thèse de doctorat. 18

[17] [Prénom à compléter] Chahed. *Titre complet de la thèse à compléter*. PhD thesis, Université à compléter, 2021. 18

[18] Amine Beyhom and Hamdi Makhlouf. *A VIAMAP exploration of the Tunisian tubu*. Tunisian Center of Musicological Publication (CTUPM), 2021. HAL Id : hal-03680903. 18

[19] Mohamed Zied Zouari. *Evolution du langage musical de l'istikhbar en Tunisie au Xxème siècle*. thèse de doctorat sous la direction de nicolas meuus, Université Sorbonne Paris IV, 2014. 19

[20] Beyhom Amine. *Mesures d'intervalles méthodologies et pratiques*. PhD thesis, 2007. 19

[21] Hend Zouari. Note d'intention : Projet qanun augmenté. `article-qanun-augmente-cfa.pdf`, 2022. Consulté dans le cadre du projet Qanun augmenté. 19

[22] Hans Leeuw. The electrumpet, a hybrid electro-acoustic instrument. In *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musi-*

cal Expression (NIME 2009), pages 193–198, Pittsburgh, PA, USA, 2009. 22

[23] Ircam. *Florence Baschet Workcourse*. 2024. Consulté le 14 mars 2026. 21

[24] J. M. Chouvel, H. Zouari, L. Quartier, and L. Fabre. Passage automatique d'un accordage à un autre en cours du jeu. Poster présenté au 16ème Congrès Français d'Acoustique (CFA), 2022. Poster scientifique. 22

[25] Dc 3v-12v mini push-pull solenoid electromagnet. Consulté le 19 septembre 2025. 27

[26] AliExpress. Moteur pas a pas avec vis-mere integree pour systemes lineaires, 2024. Consulte le 23 decembre 2025. 30

[27] Arduino. Arduino uno rev3, 2024. Consulté le 23 décembre 2025. 37

[28] Amazon.fr. Module Driver PCB L298n Dual L298n + 2A – Schéma de commande moteur électronique. Consulté le 23 décembre 2025, 2023. ASIN : B0C8SC6RRS. 38

[29] Behringer. Ecm8000 – microphone de mesure à condensateur omnidirectionnel. https://www.amazon.fr/Behringer-ECM8000-Microphone-condenseur-omnidirectionnel/dp/B000HT4RSA, 2025. Consulté le 20 décembre 2025. 49

[30] Amazon.fr. M-audio m-track interface microphone et logiciels. https ://www.amazon.fr/M-AUDIO-M-TRACK-Interface-microphone-logiciels/dp/B09TZF4HS7, 2025. Consulté le 20 décembre 2025. 50

Liste des figures

I.1 Le qanoun Tunisien 6
I.2 Le roi David jouant de la cithare 7
I.3 Le Kasf al-gumum, XIVe 7
I.4 Femme jouant d'une cithare tenue à la verticale, Acre, Palestine 8
I.5 Psaltérions, Cantigas de Santa Maria 9
I.6 Qanoun, Harem de la cour Ottomane, Constantinople, XVIIIe . 10
I.7 Qanoun, hidir agaa (fin du XVIIIe) 11
I.8 Qanoun sans sillets 12
I.9 Les sillets 14
I.10 Les caractéristiques du qanoun 15
I.11 Technique de jeu du qanoun 16
I.12 Les plectres et les bagues pour jouer le qanoun 16
I.13 Le violon augmenté 21
I.14 le Electrumpet 22
I.15 La première preuve de concept pour le qanoun 23
II.1 Conception du système à cames 26
II.2 Mini solénoide linéaire 27
II.3 Systéme de fixation du solenoide 30
II.4 Dimension du moteur pas à pas choisit 31
II.5 Conception du premier support 34
II.6 Conception du second support 35
II.7 Conception du support moteur 36
II.8 Les sillets en inox 37
II.9 Conception du montage des sillets en inox 37
II.10 La carte Arduino Uno R3 38
II.11 Le module de commande L298N 38

II.12 Cablage arduino-driver-moteur 39
II.13 Bibliothèque principale de l'arduino 40
II.14 Configuration des moteurs pas-à-pas 40
II.15 Initialisation des moteurs 41
II.16 Vitesses de déplacements des moteurs 41
II.17 Paramètres du Homing 42
II.18 La butée du qanoun 42
II.19 Broches des boutons 43
II.20 Déplacement pour les maqam et les tubu‘ 43
II.21 Variables pour détection des clics 43
II.22 Fonction : déconnection des bobines 44
II.23 Fonction : déplacement simultané 44
III.1 Les jins étudiés 47
III.2 Plage fréquentielle du microphone de mesure Behringer ECM 8000 50
III.3 La carte son M-Track Solo 50
III.4 Instalation pour prise de son 51
III.5 Prise de son d'un qanoun au sillets manuels et ceux automatisés 51
III.6 Spectre sillets manuels / automatisés pour la note RE (D) 52
III.7 Spectrogramme sillets manuels et sillets automatisés pour la note RE(D) 53
III.8 Spectre sillets manuels / automatisés pour la note Mi (E) 54
III.9 Spectrogramme sillets manuels et sillets automatisés pour la note MI(E) 55
III.10 Spectre sillets manuels / automatisés pour la note Fa (F) 56
III.11 Spectrogramme sillets manuels et sillets automatisés pour la note FA(F) 57
III.12 Spectre sillets manuels / automatisés pour la note Sol (G) 57
III.13 Spectrogramme sillets manuels et sillets automatisés pour la note SOL(G) 58

Liste des tableaux

II.1 Cahier des charges — mini solénoïde push-pull vs exigences du qanoun 28
II.2 Cahier des charges — moteur pas à pas linéaire vs exigences du qanoun 32
III.1 Positionnement des sillets selon les ajnes de maqam 48
III.2 Positionnement des sillets selon les ajnes de Tubu‘ Tunisien . . . 48

Résumé

"Qanoun" augmenté : Automatisation des degrés des "maqams" ou "tubu‘s" pendant le jeu

Ce mémoire présente un qanoun augmenté, un instrument traditionnel dont la modulation manuelle par mandales limite l’expressivité. Pour libérer la main gauche du musicien et fluidifier les modulations en temps réel, un système automatisé à quatre actionneurs pilotés par Arduino a été conçu.
Mots-clés : Qanoun augmenté, automatisation, modulation en temps réel, actionneurs, Arduino, justesse micro-intervallique.

This thesis presents an augmented qanoun, a traditional instrument whose expressiveness is limited by the manual modulation system using mandals. To free the musician’s left hand and facilitate real-time modulations, an automated system with four actuators controlled by Arduino was designed.
Keywords : Augmented qanoun, automation, real-time modulation, actuators, Arduino, micro-interval accuracy.

هذه الأطروحة تقدم قانونًا مُعزّزًا، وهو آلة تقليدية يُحدّ نظام التعديل اليدوي باستخدام الدساتين من تعبيريتها. ولتحرير اليد اليسرى للموسيقي وتسهيل التعديلات في الزمن الحقيقي، تم تصميم نظام آلي بأربعة محركات تعمل بنظام الأردوينو.
الكلمات المفتاحية : قانون مُعزز، أتمتة، تعديل في الزمن الحقيقي، محركات، أردوينو، دقة الفواصل الدقيقة.

Institut Supérieur de Musique de Sfax
Sakiet Ezzit 3021 Sfax
Tel : 74246788 - 74246718 Fax : 74246788
www.ismsf.mu.tn

Résumé

"Qanoun" augmenté : Automatisation des degrés des "maqams" ou "tubu‘s" pendant le jeu

Ce mémoire présente un qanoun augmenté, un instrument traditionnel dont la modulation manuelle par mandales limite l’expressivité. Pour libérer la main gauche du musicien et fluidifier les modulations en temps réel, un système automatisé à quatre actionneurs pilotés par Arduino a été conçu.
Mots-clés : Qanoun augmenté, automatisation, modulation en temps réel, actionneurs, Arduino, justesse micro-intervallique.

This thesis presents an augmented qanoun, a traditional instrument whose expressiveness is limited by the manual modulation system using mandals. To free the musician’s left hand and facilitate real-time modulations, an automated system with four actuators controlled by Arduino was designed.
Keywords : Augmented qanoun, automation, real-time modulation, actuators, Arduino, micro-interval accuracy.

هذه الأطروحة تقدم قانونًا مُعزّزًا، وهو آلة تقليدية يُحدّ نظام التعديل اليدوي باستخدام الدساتين من تعبيريتها. ولتحرير اليد اليسرى للموسيقي وتسهيل التعديلات في الزمن الحقيقي، تم تصميم نظام آلي بأربعة محركات تعمل بنظام الأردوينو.
الكلمات المفتاحية : قانون مُعزز، أتمتة، تعديل في الزمن الحقيقي، محركات، أردوينو، دقة الفواصل الدقيقة.

Institut Supérieur de Musique de Sfax
Sakiet Ezzit 3021 Sfax
Tel : 74246788 - 74246718 Fax : 74246788
www.ismsf.mu.tn