

Conception d'un outil mathématique/informatique pour la classification d'instruments à archet

Mémoire présenté par
Laetitia Motte

en vue de l'obtention du grade de master en
Mécanique
Option en dynamique, robotique et biomécanique
Option en conception, fabrication et mécanique des matériaux

Promoteurs
Paul Fiset, Anne-Emmanuelle Ceulemans

Lecteur
François Glineur

Année académique 2016-2017

Table des matières

1	Introduction	4
2	Descriptif et historique	6
2.1	Descriptif du violon et de l'alto actuels	6
2.2	Historique	13
2.3	Approche du problème : Mesures possibles	16
3	Méthode et outils	17
3.1	Acquisition des données géométriques	17
3.1.1	Prise des photos et génération du maillage	17
3.1.2	Préparation du maillage	18
3.1.3	Environnement de calcul	19
3.2	Matlab - Exploitation des données	21
3.2.1	Calcul des points caractéristiques	21
3.2.2	Position des coupes et nettoyage	21
3.2.3	Calcul des points caractéristiques	27
3.2.4	Résultats possibles	29
3.3	Présentation des résultats	33
3.3.1	Position des points caractéristiques	33
3.3.2	Balayage avant et arrière de l'instrument	35
3.3.3	Plans caractéristiques	38
3.3.4	Parallélisme des pointes	43
4	Résultats	45
4.1	Vue de haut	45
4.2	Balayage avant et arrière	50
4.3	Plans caractéristiques	55
4.4	Parallélisme des pointes	57
5	Conclusion	59
A	Protocole prise de photo	62
A.1	Autodesk Remake	62
A.2	Prise des photos	62
A.2.1	Support	62
A.2.2	Photos	63
A.3	Création du maillage à partir des photos	64
A.4	Retouche et choix des photos	65
B	Instruments utilisés	67

1 Introduction

Apparu au début du *XVI^{ème}*, le violon garde une part de mystère. Certains instruments du *XVII^{ème}* siècle provenant de luthiers réputés sont encore considérés aujourd'hui comme des chefs d'oeuvres, impossibles à reproduire avec une telle perfection. Le plus connu d'entre eux est sans doute Stradivarius (1644-1737) dont les instruments peuvent aujourd'hui atteindre des millions d'euros et sont sources de nombreuses recherches.

Malgré quelques modifications de l'instrument pour répondre aux besoins des musiciens, différents à travers les siècles, le violon garde une forme et une technique de construction déjà bien abouties depuis la fin du *XVI^{ème}*.

Certains instruments de la famille des cordes frottées n'ont pas profité de cette stabilité. Ils ont ainsi été transformés en violon, alto ou violoncelle grâce à d'habiles retouches et recoupes.

Le violon est également victime de falsification à travers les époques.

La datation et attribution des instruments sont ainsi difficiles à établir. La recherche d'informations précises sur différents instruments et l'analyse de ceux-ci sont donc des sujets d'actualité, au coeur de nombreuses études.

Ce mémoire a trois objectifs. Le premier consiste à proposer une méthode de mesure plus accessible que celles utilisées actuellement et vérifier sa fiabilité.

Le second objectif est de concevoir un programme de calcul permettant de donner des informations précises sur les instruments étudiés.

Le troisième objectif, quant à lui, est d'utiliser les résultats obtenus pour chaque instrument afin d'en déduire des caractéristiques communes et être capable de remarquer les irrégularités de courbure causées par un possible recoupage.

Afin de bien poser le problème et maximiser la compréhension du lecteur, la première partie de ce travail comprendra une rapide description de l'instrument, le vocabulaire utilisé par la suite pourra ainsi être fixé. Cette partie sera également composée d'un rapide résumé historique qui abordera les différentes évolutions et retouches possibles effectuées sur les violons du *XVII^{ème}* siècle jusqu'à nos jours. Finalement, nous terminerons cette partie sur les approches possibles pour atteindre nos objectifs (mesures à effectuer et représentation des résultats).

Une fois le vocabulaire et le problème décrits, nous continuerons avec une deuxième partie dans laquelle nous expliquerons la méthode utilisée pour prendre nos mesures, ainsi que les différents calculs effectués pour obtenir des informations sur chaque instrument. Cette partie se terminera sur la façon de représenter d'une manière significative et simple les informations obtenues précédemment.

Finalement nous appliquerons ces différents calculs et prises de mesures sur plusieurs instruments récents afin de pouvoir les comparer et en déduire, si possible, des éléments communs à ceux-ci.

2 Descriptif et historique

Afin de faciliter la compréhension du lecteur, nous comptons profiter de ce premier chapitre pour faire une rapide présentation du violon et mettre en avant le problème posé. Pour cela nous allons commencer par un rapide descriptif du violon/alto afin de clarifier le vocabulaire utilisé dans les chapitres suivants, nous pourrons ensuite passer à une partie plus historique avant de finalement conclure sur le problème de recoupe des instruments et les méthodes utilisées pour les reconnaître.

2.1 Descriptif du violon et de l'alto actuels

Le violon se compose de nombreuses pièces, entre 70 à 85, assemblées par collage et emboîtement. Sa construction moderne est le fruit de plusieurs siècles de recherches et essais, il a donc connu une évolution assez marquée et des formes et tailles différentes de celle fixée actuellement.

Nous décrirons rapidement les éléments principaux des instruments actuels (violon et alto) dans cette partie. Pour cela nous allons découper l'instrument en 4 parties : la tête et le manche, les cordes, la caisse de résonance, et les accessoires.

Nous nous concentrerons ici sur la tête et surtout sur la caisse de résonance, dont la forme sera étudiée dans ce mémoire. Pour des informations plus poussées ou des informations sur les cordes et les accessoires, les sources suivantes sont disponibles [4], [14], [11], ou [12].

Comme nous avons pu le remarquer lors de la prise de mesures sur divers instruments, les violons actuels (*XIX – XXI^{me}* siècle) mesurent autour 59 cm de long avec une caisse de résonance entre 36 et 39 cm de long.

Les altos ne bénéficient pas de cette standardisation. Formés à partir des instruments médiums des ensembles à cordes (comme nous le verrons dans la dernière partie), ils ont une longueur peu définie à travers les siècles. Durant cette étude nous avons utilisé deux altos qui étaient à notre disposition, les deux étant faits "sur mesure". Ceux-ci suivent les proportions des altos et violons actuels avec une longueur adaptée à la taille du musicien.

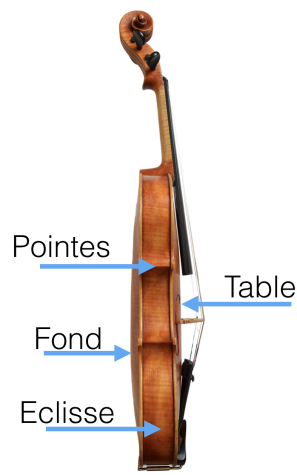
Avant de zoomer sur les 4 parties, voici un aperçu global d'un violon ou alto.



vue en perspective



vue de dos



vue de profil



vue de face

FIGURE 1 – alto sous différentes vues

Commençons par la tête, reprise à la figure 2.

La partie supérieure de la tête est composée d'une volute ou de décorations plus originales, des exemples sont disponibles ci-dessous (Fig. 4).

Nous avons ensuite le chevillier, qui comporte quatre trous par lesquels passent les chevilles. Les cordes sont enroulées autour des chevilles qui permettent ainsi de gérer la tension dans les cordes et accorder l'instrument.

La touche est finalement assemblée à la tête en étant collée au manche. On peut observer la présence d'un sillet sur la touche, juste sous la jonction chevillier-touche. Celui-ci est pourvu de quatre encoches qui permettent de stabiliser les cordes.



FIGURE 2 – tête sous différentes vues



FIGURE 3 – zoom sur la touche, vue de profil

La touche se prolonge plus bas, jusqu'à un tiers de la table d'harmonie, sans la toucher comme on peut le voir sur la vue de profil figure 3.



Violon J.Stainer,
XVIIe siècle



Violon René Moreau,
1914/1918



FIGURE 4 – différentes volutes sculptées

Nous passons ensuite à la partie centrale de l'instrument qui sera la partie étudiée durant ce projet : la caisse de résonance. Celle-ci peut être décomposée en 3 parties, le fond, la table d'harmonie et les éclisses, visibles sur la figure suivante (Fig. 5).

Le fond est généralement créé à partir de deux pièces de bois symétriques collées entre elles suivant la longueur du violon, mais il peut aussi être construit à partir d'une pièce unique. La table d'harmonie est habituellement faite en deux parties également.

Lors de la construction du violon, le luthier essaiera de donner une forme semblable à la table et au fond (forme du creux, courbure ...). C'est donc une première observation qui devra être faite durant cette étude : vérifier que la forme générale du fond et de



FIGURE 5 – Caisse de résonance

la table se ressemblent un minimum. Pour cela nous représenterons une vue globale de l'instrument et calculerons également la position des points d'inflexions, caractérisant les courbures de l'instrument, le long de la table et du fond. Ces résultats nous permettront de faire une première comparaison entre ces deux parties, une trop grosse différence de forme pouvant être causée par un mélange d'instruments (récupération d'une table ou d'un fond à partir d'un autre instrument) ces informations constituent ainsi un premier indice pour vérifier l'authenticité de l'instrument.

La vue de profil sur la figure 5 permet d'observer les éclisses. Ce sont six fines lamelles de bois souples collées perpendiculairement au fond et à la table et qui permettent de les assembler en donnant une certaine épaisseur entre les deux. Cette épaisseur est censée rester constante le long de l'instrument, les plans formés par les points positionnés à la jonction éclisse-table et la jonction éclisse-fond devraient donc être parallèles. L'orientation de ces plans sera un autre résultat à afficher, en particulier la comparaison d'orientation entre les différents plans obtenus.

Un autre point recherché lors de la construction de l'instrument autour de ces éclisses concerne la direction des quatre pointes situées dans la partie centrale (deux d'entre elle sont visibles sur la vue de profil de la figure 5). En effet elles doivent être parallèles également, c'est donc là aussi une prise de mesure et une représentation de résultat qui seront abordées par la suite.

La table d'harmonie est visible sur la vue de face figure 5. Celle-ci est percée de deux ouïes, ou ff qui permettent la diffusion du son produit dans la caisse.



FIGURE 6 – Zoom sur les ouïes de deux altos

La forme de ces ouïes varie légèrement entre les instruments en fonction du dessin choisi par le luthier (deux ouïes provenant d’alto différents sont affichées à la figure 6), Leur forme exacte peut donc être aussi une bonne mesure à garder afin de classer les instruments en fonction de la signature employée.

Sur tout le contour de la table et du fond, à proximité du bord, nous pouvons également observer 2 ou 3 lignes noires. Il s’agit en fait de fines lamelles de bois incrustées dans la table et le fond qui suivent les courbures de l’instrument. Ces filets sont utilisés comme cerclage et permettent ainsi de limiter le risque de fente à ces endroits. La figure 6, surtout la photo de gauche, permet de bien voir ce filet à la hauteur de l’ouïe.

Sur la figure suivante (Fig. 7) nous avons effectué une coupe latérale sur le fond d’un alto (placée en bleu sur la photo de gauche) afin de bien observer le relief de cette caisse. En effet on peut remarquer un léger creux à proximité des bords, situé autour -6 et 6 sur la coupe figure 7. Cette gorge, appelée ragrayure pour la suite, est présente sur tout le contour de l’instrument. Comme nous le verrons dans la prochaine partie plus historique, le contour de l’instrument est particulièrement victime de retouche, la ragrayure aussi, sa position et sa profondeur devront donc être mesurées et seront également des résultats à afficher et analyser.

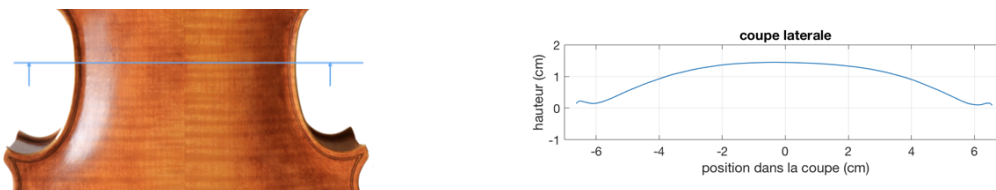


FIGURE 7 – Coupe latérale centrale d’un alto



FIGURE 8 – zoom sur le chevalet

Au centre de l'instrument nous pouvons voir le chevalet de la forme d'une petite planche en bois clair surmontée d'un arrondi avec quatre encoches par lesquelles passent les cordes (Fig. 8). La tension qui réside dans chaque corde permet de maintenir le chevalet droit, celui-ci n'étant pas collé à la table mais simplement déposé dessus. Il permet de transmettre les vibrations des cordes à la table d'harmonie et doit donc être positionné avec soin.

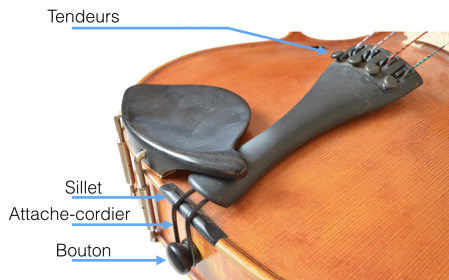


FIGURE 9 – vue de dessous

Les cordes sont tenues grâce aux chevilles déjà décrites précédemment (Fig. 2) d'un côté, et grâce au cordier ou tire-cordes de l'autre. De petites vis, les tendeurs, peuvent également être installées sur le cordier afin de faciliter l'accordage. On remarque que le cordier ne touche pas la table, il est maintenu en l'air grâce à la tension régnant dans les cordes et est retenu grâce à son attache-cordier relié au bouton. La tension s'exerçant sur l'attache-cordier et le bouton est supportée par un sillet, visible sur la figure 9.

Finalement le dernier élément visible sur la table d'harmonie est la mentonnière, qui permet au joueur de poser son menton et de protéger le bois de sa transpiration.

Concernant l'intérieur de l'instrument, il ne sera pas étudié ici, les méthodes de mesures utilisées n'étant pas adaptées pour cette partie non visible.

Nous citerons donc rapidement deux éléments nécessaires à la bonne sonorité de l'instrument : la barre d'harmonie et l'âme de l'instrument (Fig. 10).

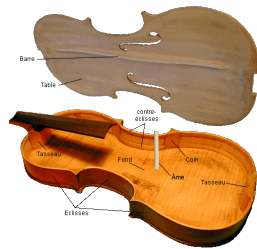


FIGURE 10 – Intérieur de la caisse de résonance

La barre d'harmonie est collée à la face arrière de la table sur les $\frac{3}{4}$ de sa longueur, située sous les cordes graves. Elle permet de renforcer la table et de modifier la propagation des vibrations afin de favoriser certains sons.

L'âme est un petit cylindre joignant le fond et la table, située sous le chevalet, légèrement décentrée. Elle permet de transmettre les vibrations à l'ensemble de la caisse, il s'agit donc d'une pièce maîtresse qui doit être positionnée avec beaucoup de précision en fonction de la forme de l'instrument.

Le choix des matériaux est justifié par leur qualité sonore et leur esthétique. On utilise de l'ébène pour la touche, de l'épicéa pour la table. Les éclisses étant des lattes de bois de très faible épaisseur, un bois dur comme l'érable est utilisé. Le fond et le manche sont également en érable. Pour les accessoires comme le cordier, la mentonnière, les chevilles ... d'autres bois durs sont privilégiés (ébène, buis, palissandre, ...). La couleur de l'instrument dépend du bois et du vernis utilisé. Ce dernier est formé à partir d'un mélange de résine, de gomme et de pigments. Il a une fonction esthétique et protectrice.

2.2 Historique

Nous nous contenterons ici d'un très rapide résumé de l'évolution du violon, le but étant d'amener le problème de recoupe effectué sur divers instruments, qui est la source de ce mémoire. Pour plus d'informations sur ce sujet nous conseillons les références suivantes [9],[8], [13] et [1].

"Le violon est un instrument à cordes frottées qui apparaît à la fin du XVIe siècle. Divers autres instruments à cordes frottées ont existé avant le violon, le principe de l'archet étant attesté en Europe dès le XIe siècle. A cette époque reculée, les instruments à archet sont généralement des vièles qui ont une caisse et un manche comme le violon moderne, mais dont la morphologie et l'accord sont différents et par ailleurs variables.

A la fin du Moyen Âge, un nouveau type d'instrument à archet apparaît en Occident : le rebec. Cet instrument provient du rebab andalous. Il possède une caisse monoxyle et des chevilles latérales, contrairement aux vièles qui ont généralement des chevilles frontales.

Le violon est né de la combinaison de caractéristiques héritées de la vièle (la caisse, le manche) et du rebec (le chevilles et un accord des cordes en quintes). Il n'est pas simple de situer avec précision son apparition au plan historique et géographique, mais on sait qu'à l'origine, c'était un instrument de ménestriers qui construisaient eux-mêmes leurs instruments. Les premiers violons fabriqués par des professionnels de la facture instrumentale ont vraisemblablement vu le jour dans le Nord de l'Italie à la fin du XVIe siècle, mais bon nombre d'instruments prétendument antérieurs à 1650 sont contrefaits ou fortement altérés." ¹

Le violon est d'abord "un instrument populaire et de plein air [3]" joué grâce à un apprentissage basé sur l'imitation et la répétition (pas de repère pour placer les doigts ...)

"Par rapport aux autres instruments à cordes de son époque, le violon a une sonorité plus proche de la voix humaine, plus claire, plus éclatante aussi. Par ailleurs, sa forme autorise des virtuosités plus grandes que celle de ses concurrents.

Cette sonorité éclatante le fait d'abord rejeter par les "gens de goût" de l'époque. Puis, grâce à des compositeurs comme Monteverdi ou Lully, qui composent pour lui (ou, du moins, qui l'intègrent nommément dans les formations pour lesquelles ils composent) des oeuvres savantes, le violon acquiert ses lettres de noblesse pour devenir, en quelques dizaines d'années, l'instrument-roi de l'orchestre." [7]

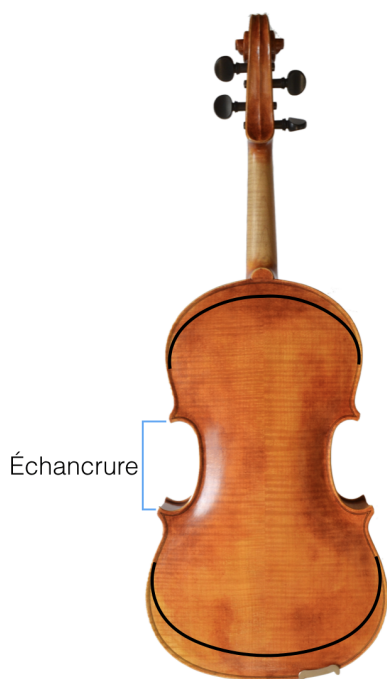
On peut citer 2 exemples représentant ce gain de notoriété : l'Orfeo de Monteverdi vers 1600 et la troupe des Vingt-Quatre Violons du roi, formée en 1626 et se produisant à la cour de France.

1. Anne-Emmanuelle Ceulemans, notes juin 2017

Les Vingt-quatre Violons du Roi sont une bonne illustration des différentes formes d'instruments à cordes utilisés à l'époque. L'ensemble se compose en effet de 5 familles de violons différentes, classées ici de la plus aiguë à la plus grave, d'abord 6 dessus de violon (proche des violons actuels avec quelques différences de proportions), puis 4 hautes-contre de violon, 4 tailles de violon, et 4 quintes de violons, et finalement 6 basses de violon (plus grand que le violoncelle actuel).

Les trois familles entre le dessus de violon et la basse de violon ont disparu depuis le *XVIII^{me}* et la forme actuelle des ensembles à cordes a été instaurée (violon, alto, violoncelle et contrebasse). De nombreux instruments ont donc dû être retravaillés afin d'obtenir cette nouvelle formation, en particulier les hautes-contre, tailles et quintes de violons qui ont ainsi été transformées en grand violon, alto, ou petit violoncelle.

La transformation la plus fréquente est la recoupe des instruments trop grands, par exemple des haute-contres ou des tailles de l'ancienne tradition française.



Pour réduire la taille de la caisse le luthier va devoir enlever de la matière particulièrement côté cordier et côté touche, en gardant les échancrures intactes, l'objectif étant de bien garder les largeurs en diminuant les longueurs de l'instrument. Afin de bien illustrer ce point, nous avons représenté en traits noirs sur la figure 11 une recoupe possible.

Dans la partie précédente nous avons pu remarquer la présence d'une ragrayure sur tout le contour de l'instrument, celle-ci sera donc traversée par la coupure lors d'un recoupage et la régularité de la courbure sera altérée.

FIGURE 11 – Matière enlevée

Les techniques élaborées permettent de changer les proportions avec habileté en conservant les bords et les filets originaux (une des procédures possibles est expliquée dans [12]).

La table et le fond obtenus après recoupe sont recreusés afin de se rapprocher des courbures d'un instrument d'origine, les transformations peuvent être très discrètes et l'authenticité de certains instruments difficilement établie.

Une autre cause possible de modification sont les légers changements auxquels le violon a été sujet durant le *XIX^{ème}* siècle. En effet avec le développement des salles de concert vers 1800 les instruments doivent produire plus de décibels, un moyen d'y parvenir était de renforcer la barre d'harmonie ou d'augmenter la longueur des cordes. Pour cela le manche est basculé vers l'arrière et la touche est allongée. Via un rehaussement du chevalet on peut ainsi tendre davantage les cordes.

"Toutes ces modifications permettent à l'instrument de jouer dans les salles de spectacle les plus grandes, pour des répertoires de grande virtuosité. A partir du début du XIX^e siècle, un grand nombre de violons anciens sont modernisés pour répondre aux nouvelles attentes des musiciens." [5]

Le changement de taille des instruments durant les derniers siècles ne sont pas la seule source de transformations. Il y a en effet l'importante spéculation autour des instruments à archet.

"Par son aspect décoratif, l'instrument de musique devient fréquemment objet de collection et, de ce fait, tombe sous le coup de la spéculation ; qui dit spéculation dit falsification ; celle-ci est florissante parmi les instruments et à même donné lieu au début du *XX^{ème}* siècle à une industrie en Italie : un certain Leopoldo Franciolini publia un catalogue de ce qu'il vendait ; il s'agissait d'instruments faits de morceaux anciens remontés dans des parties neuves ou d'instruments entièrement falsifiés. Nombre de violons sont des "arlequins", avec une table d'un facteur, un fond d'un autre." [13]

Ces modifications, parfois très bien cachées, sont donc difficiles à reconnaître.

"L'identification des instruments de lutherie est le fait d'experts assermentés, qui ont appris à former leur oeil, durant de longues années" [13].

La datation, l'attribution et l'authenticité des instruments sont donc des points délicats, toujours sujets de recherches.

2.3 Approche du problème : Mesures possibles

Nous allons finalement profiter de ce dernier sous-chapitre pour définir quelques pistes de mesures possibles afin d'obtenir plus d'informations sur les instruments étudiés. L'objectif de ces mesures est double. Donner des informations supplémentaires précises sur les instruments mais aussi essayer de confirmer mathématiquement si l'instrument est authentique ou recoupé.

La première étape consiste à repérer les types des points pouvant avoir une position significative sur l'instrument, le prochain chapitre présentera les trois types de points étudiés. Ceux-ci seront calculés sur tout le long de la table et du fond afin de pouvoir comparer la courbure de ces deux parties.

Concernant les éclisses nous pouvons calculer la différence d'orientation entre les pointes, sachant que celles-ci doivent être parallèles (*Section 2.1*). De plus, la distance entre la jonction éclisse-table et la jonction éclisse-fond doit rester constante (les éclisses étant perpendiculaires à la table et au fond, et de largeur constante). Les plans formés par ces deux jonctions devraient donc être parallèles. Leur différence d'orientation est alors un résultat à afficher.

Finalement nous exploiterons la position de certains points sur différents instruments récents afin d'en déduire des caractéristiques communes.

3 Méthode et outils

3.1 Acquisition des données géométriques

La première étape consiste à récupérer certaines mesures sur différents instruments afin de pouvoir déterminer des éléments communs, ou au contraire propres à chacun.

Vu la forme complexe de l'instrument (position de la ragrayure, des points d'inflexion, courbures, ...) et la quantité importante de données à récupérer, la technique habituelle repose sur l'utilisation de scanner 3D ou scanner d'hôpitaux (tomodensitométrie), cependant cette méthode étant compliquée à mettre en place, particulièrement pour un grand nombre d'instruments, nous avons essayé une technique en plein développement et beaucoup plus accessible : la photogrammétrie qui permet de générer un maillage à partir de photos de l'objet, prises selon différents angles et différentes positions. Ce maillage nous permet ainsi d'avoir accès virtuellement à l'instrument pris en photo et collecter ainsi une base riche et toujours disponible pour les différents tests, recherches ultérieures et résultats finaux.

Avant de pouvoir exploiter ce maillage, une première prise en main est nécessaire (mise à l'échelle, repère, nettoyage ...). Nous pouvons ensuite exporter les points qui nous intéressent au format adéquat (.pts) afin de les récupérer dans un environnement de calcul (Matlab²) et pour pouvoir faire les coupes, mesures et calculs désirés.

Ces différentes étapes pour obtenir un maillage prêt à être utilisé sont reprises dans le schéma bloc ci dessous et sont décrites plus en détails dans les paragraphes suivants.

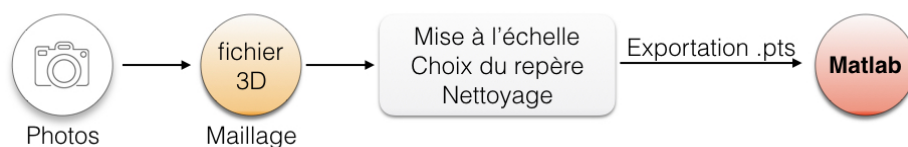


FIGURE 12 – Schéma bloc : récupération des données

3.1.1 Prise des photos et génération du maillage

La prise de photos varie en fonction du logiciel de photogrammétrie utilisé. Durant ce projet nous utilisons Autodesk Remake³. Le protocole précis à suivre est défini précisément en Annexe B.

2. Matlab : <https://nl.mathworks.com/>

3. Autodesk Remake : <http://remake.autodesk.com>

3.1.2 Préparation du maillage

Lors de génération du maillage, aucune mesure de référence n'est disponible. Toutes les proportions sont donc basées sur une valeur de référence fixée arbitrairement par le logiciel. Une mise à l'échelle est alors nécessaire ; pour cela nous utilisons une mesure caractéristique précise et facilement accessible comme la distance entre les deux pointes du violon (cf Fig. 13), généralement autour de 7.5 - 6 cm pour les violons et autour de 9.7 cm pour les altos.



FIGURE 13 – Mise à l'échelle

De plus, pour pouvoir utiliser notre programme de calcul sur tous les maillages enregistrés et facilement effectuer les mesures souhaitées, nous devons connaître la position et la direction des axes de référence. Le plus simple est de choisir l'emplacement du repère de référence selon certains éléments facilement reconnaissables des instruments. Concernant les directions, considérons un violon posé horizontalement sur le dos : L'axe x est orienté suivant la longueur de l'instrument, l'axe y suivant sa largeur et les z vers le haut, l'origine se trouve à hauteur des bords, centré entre les deux pointes arrières. Le repère ainsi défini est visible Fig. 14.



FIGURE 14 – Repère de référence

Finalement la dernière étape avant l'exportation des points désirés consiste justement à sélectionner ces points. Il faut donc effacer le décors et les points indésirables. Les figures suivantes représentent les maillages qui seront utilisés pour étudier précisément, étape par étape, le fond et la table. Les points qui ne devront pas être utilisés ont été effacés. De plus le fait d'effacer les éléments extérieurs à la table comme la touche, le chevalet ou le cordier nous permettent de récupérer cette surface non visible sur les photos, et donc non généré sur le maillage, grâce à l'approximation appliquée au maillage comme nous le verrons dans les prochaines sections. Pour les pointes nous utiliserons le maillage non nettoyé, seulement 8 points (2 par pointes) sont nécessaires pour retrouver leur position et leur direction.



FIGURE 15 – Maillage prêt pour l'exportation

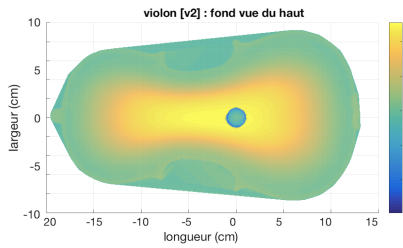
3.1.3 Environnement de calcul

Le maillage obtenu via Autodesk Remake étant enregistré dans un format `.rcm` qui ne peut pas être directement ouvert avec Matlab, nous avons décidé d'utiliser la conversion en format `.pts`. Les différences entre les 3 formats possibles (`.obj`, `.xyz` et `.pts`) sont décrites ci dessous.

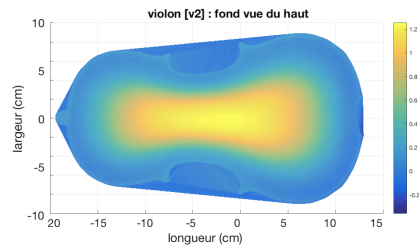
Exporter le format en `.obj` permet de pouvoir le transformer plus facilement, via un autre logiciel plus léger, comme meshLab⁴, cependant lors de la transformation du fichier d'origine `.rcm` en fichier `.obj` beaucoup d'informations sont perdues et le maillage perd donc en qualité. L'exportation en `.xyz` permet de conserver cette qualité issue du maillage HD original, par contre l'origine et les points proches de celui-ci sont marqués par des reliefs prononcés qui modifient la forme réelle de l'instrument (voir Fig. 16). On remarque que l'exportation `.pts` permet de garder cette même qualité tout en évitant ce problème, il suffit alors de changer l'extension `.pts` en `.txt` pour pouvoir l'ouvrir et l'exploiter dans Matlab, c'est donc la solution que nous avons conservée pour la suite.

Ces trois dernières figures (Fig. 16 et Fig. 17) ont été obtenues grâce aux fonctions `meshgrid` et `griddata`. En effet cette dernière prend comme argument les coordonnées X,Y

4. MeshLab : <http://www.meshlab.net/>



Après exportation en .xyz



Après exportation en .pts

FIGURE 16 – Fond d’un violon généré via Matlab à partir de différents types d’exportations

et Z des points connus, accessible via le fichier .pts/.txt exporté précédemment, ainsi que les positions en x et y pour lesquels la dernière coordonnée z doit être estimée. En utilisant un bon nombre de position (x,y) grâce à la fonction *meshgrid* de Matlab qui permet de créer une grille de points, nous pouvons donc relier avec précision les points connus et approximer la position des points inconnus entre ceux ci.

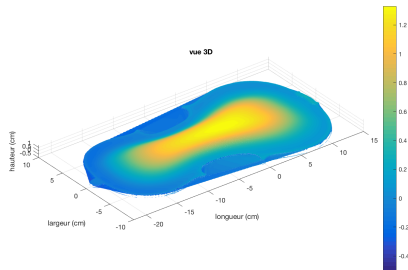


FIGURE 17 – Vue en perspective

On remarque alors sur ces trois dernières figures (Fig. 16, Fig. 17) la création de points supplémentaires mal estimés car normalement inexistants. Situés entre les points ainsi qu’ autour de l’extrémité gauche, ils devront être éliminés. On devine heureusement facilement la forme de l’instrument exacte. De plus la différence de hauteur entre les points réels et ceux mal approximés en dehors de l’instrument est suffisamment importante pour rendre leur gommage possible comme nous le verrons par la suite.

3.2 Matlab - Exploitation des données

Toutes les coordonnées des points utiles étant maintenant enregistrées sur la base d'un repère bien fixé, nous pouvons alors les charger sous Matlab pour pouvoir faire les coupes, mesures et calculs qui nous intéressent.

L'objectif principal étant de trouver des éléments caractéristiques de l'instrument, la première étape consiste à calculer la position de points précis comme les maximums extérieurs (en bleu sur la coupe de la figure 18 ci dessous), les minima (en rouge) formant la ragrayure ainsi que les points d'inflexion (en jaune).

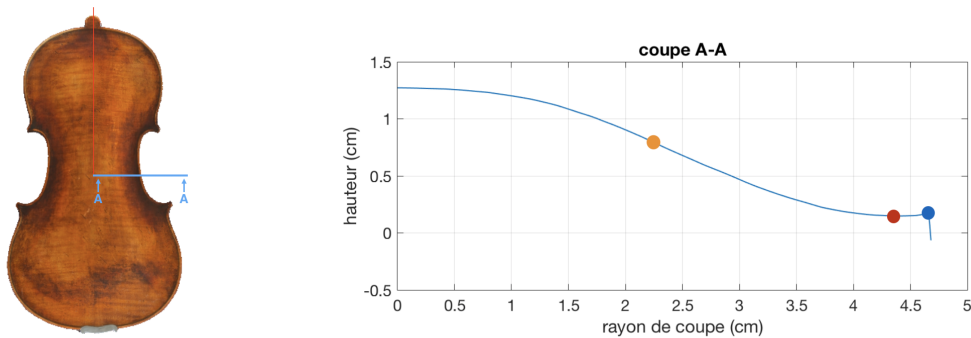


FIGURE 18 – Coupe latérale centrale : points recherchés

3.2.1 Calcul des points caractéristiques

Plusieurs types de points sont à retrouver. En plus de leur détermination, ils devront mener aux présentations claires et significatives des résultats, destinés en partie à un public musicologue et organologue.

Pour cela nous utilisons l'environnement numérique Matlab avec plusieurs fonctions principales, utilisant elles mêmes des fonctions prêtes à l'emploi disponibles dans les toolboxes *curve fitting* et *DSP System*.

Ces différentes fonctions ainsi que le fonctionnement général du code utilisé sont décrits dans le schéma-bloc ci dessous, ils sont expliqués plus en détails par la suite (Fig. 19)

3.2.2 Position des coupes et nettoyage

La fonction de récupération des données *ref.m* a pour but de renvoyer une première image globale, soit en perspective, soit vue du haut (cf Fig. 16 et 17) afin d'avoir une première idée de la forme de l'instrument, elle permet également de vérifier si les points récupérés correspondent effectivement à ceux attendus (bonnes largeurs et longueurs confirmant une mise à échelle réussie, pas de points forts extérieurs à l'instrument qui seraient

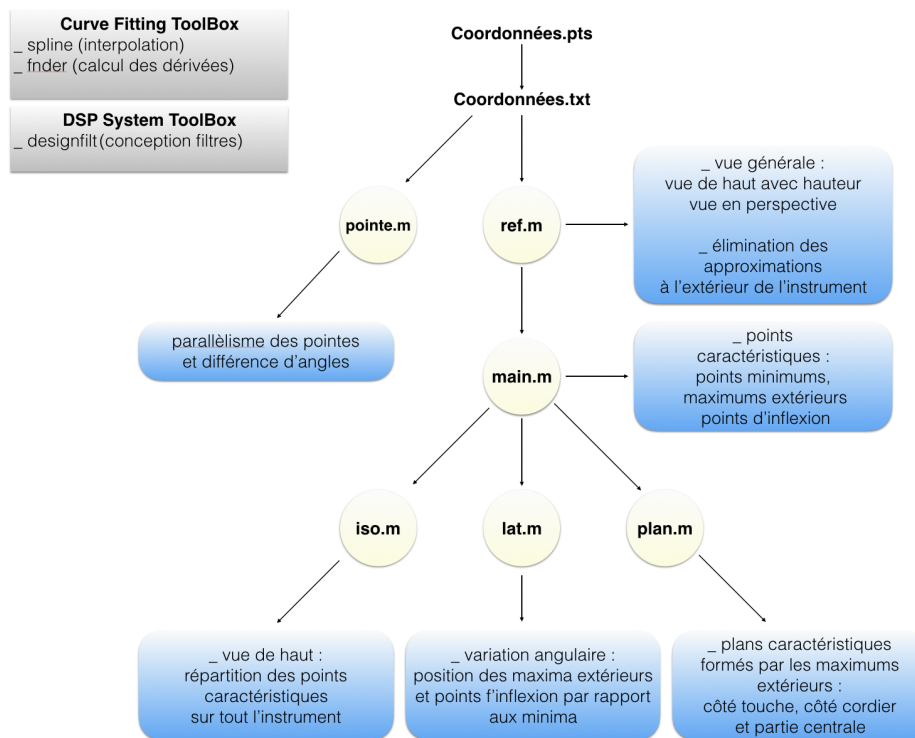


FIGURE 19 – Schéma bloc : fonctions principales, entrées et sorties

dus à un décor ou des erreurs mal nettoyées dans le logiciel 3D ...). Pour cela une interpolation 3D des points constituant le maillage et formant la surface est nécessaire. Elle sera ensuite utilisée comme base pour les prochains calculs. Le maillage étant très fin tout comme la grille utilisée pour approximer les points n'appartenant pas au maillage, nous pouvons nous baser avec une bonne certitude sur les résultats issus de cette interpolation. Comme cité précédemment, nous souhaitons retrouver les points maximums extérieurs, les points minimums (ragrayure) ainsi que les points d'inflexion sur l'ensemble de l'instrument (cf Fig. 18). Afin de gagner en précision, en rapidité et retrouver facilement ces points pour fournir une méthode de calcul robuste, il est préférable d'utiliser des coupes normales aux éclisses comme représenté sur le schéma suivant (Fig 20) ; le relief est ainsi bien marqué.

Les arrondis au niveau de la touche et du cordier ne sont effectivement pas tout à fait circulaires, cependant afin de pouvoir poser une origine commune à toutes nos coupes dans chacun des arrondis et pouvoir l'appliquer par défaut à plusieurs types d'instrument, nous fixons deux points centraux fixes (un pour l'arrondi proche de la touche X1, l'autre

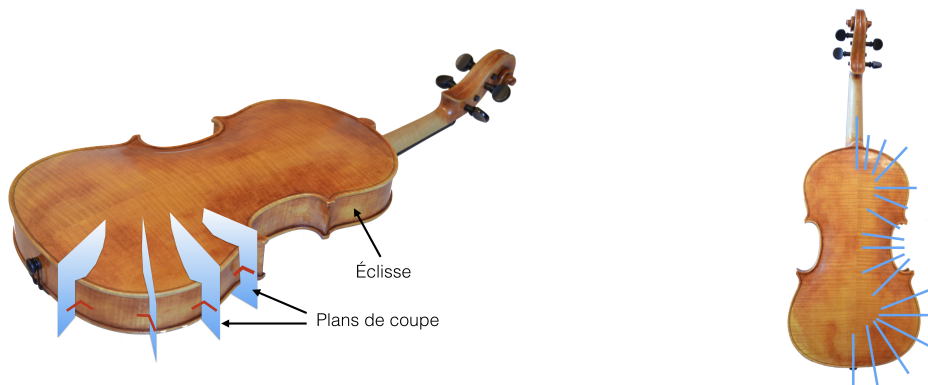


FIGURE 20 – Coupes normales aux éclisses

pour celui proche du cordier X_2) desquels partiront toutes nos coupes angulaires fixées de façon à se rapprocher le plus possible de la perpendiculaire recherchée lorsque l'on passe d'une point à l'autre. Ces deux points, ainsi que les cotations utilisées pour les angles (angles nuls, positifs, négatifs ...) sont représentés sur le schéma ci dessous (figure 21).

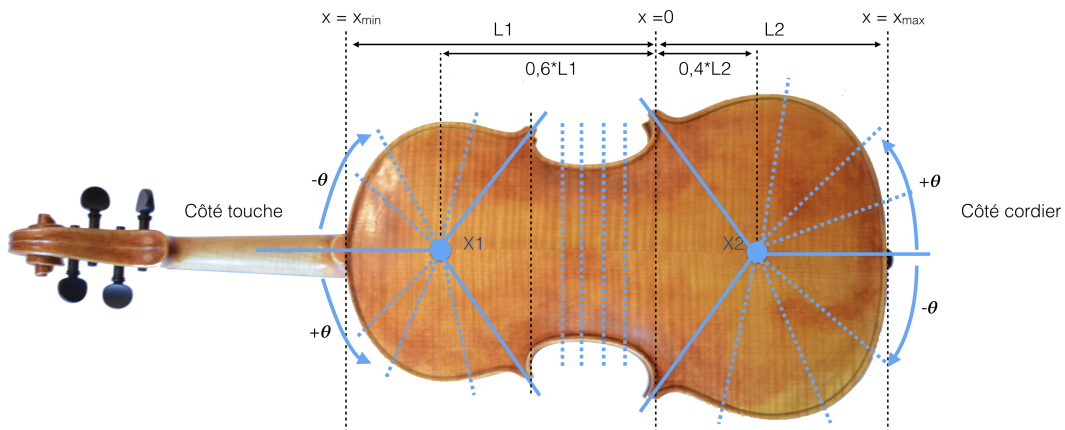


FIGURE 21 – Position des plans de coupes utilisés

Afin de fixer la position de ces 2 points (X_1 et X_2) sur les différents instruments enregistrés, nous avons cherché le cercle approchant au mieux l'arrondi. Le centre de cercle varie d'office selon les instruments mais on peut essayer de l'approcher en fonction d'un certain pourcentage de la longueur de celui-ci. Nous avons récupéré ce cercle sur 4 instruments (2 altos et 2 violons). A partir des résultats obtenus nous avons décidé de fixer la position du X_1 par rapport au L_1 et la position du X_2 par rapport au L_2 via un certain facteur de proportionnalité : le X_1 est ainsi situé à $0.6 * L_1$ et le X_2 à $0.4 * L_2$ (cf Fig.

21).

Concernant la partie centrale, nous utilisons des coupes latérales qui peuvent progressivement être déplacées le long de l'axe des x .

Comme déjà remarqué dans la partie *Section 3.1.3*, l'approximation des points autres que ceux précédemment enregistré mène à la création de points indésirables extérieurs à l'instrument. Ceux ci peuvent être observés sur les Figures 16, 17 et 22, en particulier entre les pointes mais sont présents sur presque tout le contour de l'instrument. Cependant ils sont évalués à une hauteur différente du vrai contour. Ils peuvent ainsi être facilement repérer et éliminer pour conserver seulement les points composant réellement l'instrument. Afin d'illustrer ce propos, deux coupes représenté en rouge sur la figure 22 ont été tracées. Les points à effacer sont visibles sur ces deux coupes (Fig. 23). Ils apparaissent à partir de $x = 9.8cm$ pour la coupe A-A et $x = 6.6cm$ pour la coupe B-B.

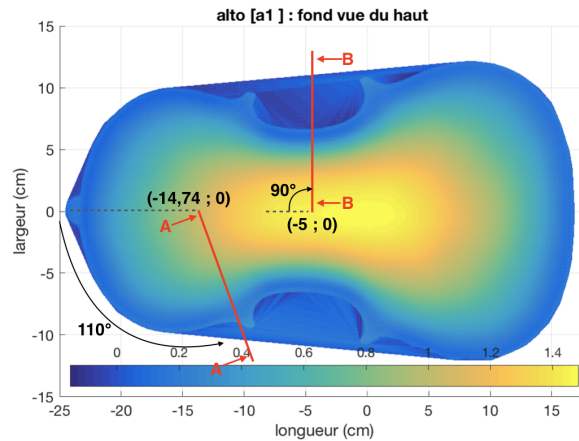


FIGURE 22 – Fond d'un alto vu de haut : Interpolation des points enregistrés

Afin de pouvoir concevoir un programme de calcul à la fois simple et robuste qui permet de retrouver les points visés, il est nécessaire d'éliminer les points non mal estimés en dehors de l'instrument. Pour cela, plusieurs méthodes ont été envisagées, toutes reposant sur ce changement de hauteur brusque par rapport aux points précédents formant la surface de l'instrument. Ce changement brutal est notre seul moyen fiable de déterminer la limite entre les points du maillage et ceux créés en dehors de l'instrument par l'interpolation. Les données approximées génèrent des petites oscillations toujours présentes malgré l'utilisation d'un bon filtre, le choix de celui ci est justifié à l'annexe D, il s'agit d'un filtre passe bas butterworth qui permet d garder une bonne précision autour de la ragrayure et des points maxima extérieurs. Nous ne pouvons donc pas juste couper au deuxième minimum local, le nombre de minimum locaux n'étant pas connus.

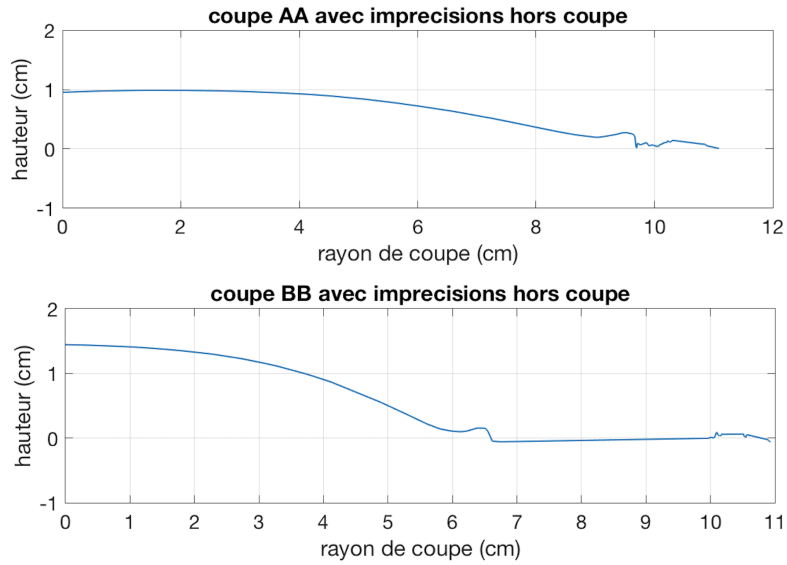


FIGURE 23 – Coupes avec défauts extérieurs à l'instrument

La première méthode a consisté à prendre un point limite ayant une ordonnée assez basse et à effacer toutes les données se trouvant au delà de ce point. Par exemple, sur la base de la coupe B-B (Fig. 23), nous pouvons fixer le point limite de référence comme étant le premier point dont l'ordonnée est inférieur à 0 et effacer tous les autres points à sa droite. Cette méthode a l'avantage d'être simple, cependant le choix de l'ordonnée limite doit être ajustée avec soin, adaptée aux différents instruments sur tout le contour.

Une autre solution pour éviter ces désavantages est de repérer les minima locaux, en déduire l'endroit où la plus grosse différence de hauteur entre 2 minimums locaux consécutifs a lieu et de prendre ce dernier minimum comme point d'arrêt pour la coupe. Reprenons de nouveau la coupe B-B (Fig. 23) ; la différence maximale de hauteur entre 2 minima locaux consécutifs est obtenu via le minimum local à $x = 6\text{cm}$ et celui à $x = 6,6\text{cm}$. Nous arrêtons donc la coupe à ce niveau là, soit $x = 6,6\text{cm}$. Cette méthode est assez fiable mais génère tout de même quelques erreurs ; la ragrayure et le dernier point à conserver pouvant être assez proche suivant l'axe des z , un mauvais minimum peut être sélectionné.

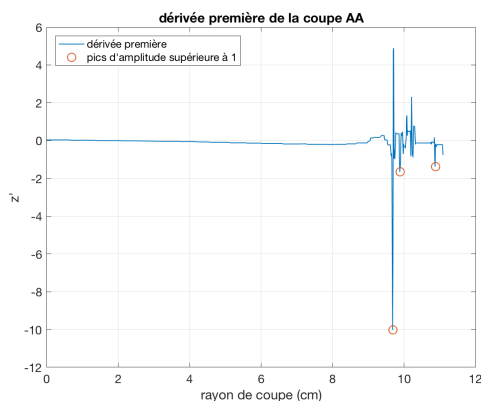


FIGURE 24 – Dérivée première de la coupe A-A

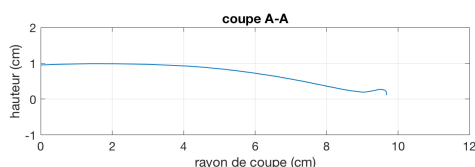


FIGURE 25 – coupe A-A nettoyée

Cette étape de nettoyage est exécutée par la fonction *ref.m* (Fig 19). Elle prend donc comme argument le fichier .txt dans lequel sont enregistrées toutes les coordonnées des points formant la partie du maillage souhaité afin de faire une approximation 3D et renvoyer un premier aperçu général des points enregistrés. Il s'agit d'un objectif secondaire, le principal étant de pouvoir effacer les points de l'interpolation qui sont indésirables pour la suite et ainsi avoir des coupes propres pouvant être facilement exploitables. Cette fonction *ref.m* prend donc également en argument d'entrée la position et la direction de la coupe à effectuer (coté touche, coté cordier ou coupe centrale, position pour les arrondis par défaut si non renseigné, angle de coupe θ à fixer ...).

Le choix de la coupe et son nettoyage étant maintenant possible, nous pouvons facilement calculer les points caractéristiques recherchés (ragrayure, maximum extérieur, point d'inflexion).

Une nouvelle approche a donc été utilisée. Celle-ci se base cette fois-ci sur la pente très forte que l'on peut observer lorsque l'on arrive aux bords de l'instrument.

Afin d'illustrer cette méthode, nous avons tracé la dérivée première de la coupe A-A (Fig. 24). Après plusieurs tests sur différents instruments, nous considérons que le changement de hauteur brusque, marquant ce changement entre points réels et points à effacer, produit une dérivée d'amplitude supérieure à 1, on cherche donc le premier minimum local inférieur à -1, repéré par un cercle rouge à 9,69 pour cette coupe-ci. Afin d'éviter des erreurs et de bien marquer la différence entre des pentes pouvant être assez importantes dues aux oscillations de surface et celle à récupérer, nous utilisons un filtre passe-bas avant de calculer la dérivée.

3.2.3 Calcul des points caractéristiques

Une fois la coupe bien nettoyée on peut facilement récupérer le point minimum et le maximum sur les bordures (Fig. 18). Pour cela un premier lissage de la coupe est nécessaire afin de limiter les oscillations entre 2 points provenant du maillage et ainsi s'assurer que le dernier maximum local sera bien le maximum des bords recherché. La conception du filtre est réalisée grâce à la fonction *designfilt* disponible dans la toolbox *DSP System*. Après plusieurs tests concernant le type de filtre (filtre moyen, filtre moyen avec poids, filtre passe bas, filtre de Savitzky Golay ...) le choix retenu s'est porté sur un filtre passe bas (infinite impulse response (IIR) lowpass filter) de type butterworth, qui permet de lisser un minimum la courbe sans perdre l'information importante à la fin de celle ci (voir figure 26).

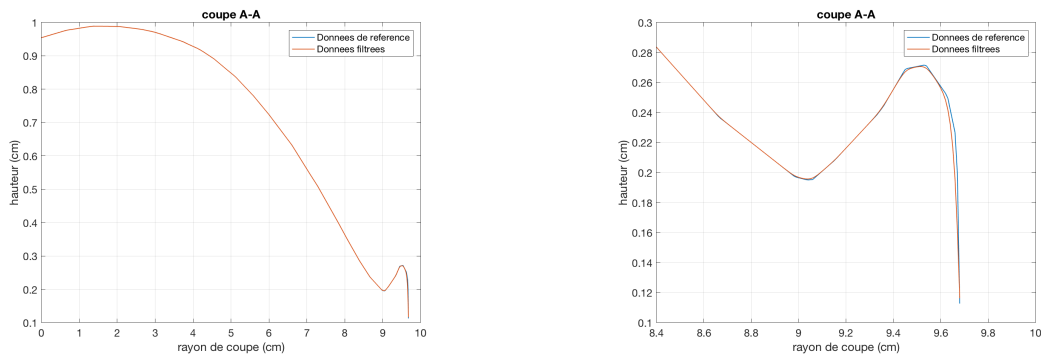


FIGURE 26 – Coupe A-A avec filtre et zoom sur le bord extérieur

Grâce à la fonction *findpeaks* de Matlab on peut alors facilement retrouver la position du maximum extérieur. Le minimum recherché, soit la position de la ragrayure, est finalement le minimum entre le maximum global et ce dernier maximum local.

Il ne reste donc plus que le dernier point caractéristique à retrouver, soit le point d'inflexion qui correspond au moment où la dérivée seconde s'annule entre le maximum global et le point représentant la ragrayure sur la coupe d'origine, ce qui revient à chercher le minimum de la dérivée première dans cet intervalle.

La dérivée première de la coupe précédemment lissée est représentée à la figure 27

Comme on peut le remarquer, le filtre appliqué précédemment produit une dérivée encore en escalier et peut générer d'importantes oscillations. Pour trouver le minimum de cette courbe nous utilisons donc de nouveau un filtre passe bas butterworth. Le résultat est donné via la courbe rouge de la figure 27.

Dans certains cas où les oscillations sont trop prononcées, une imprécision due à la simplification de la courbe peut être générée. Un autre exemple de coupe a été obtenue à partir d'un autre instrument afin d'illustrer ces différentes formes possibles de dérivées et résultats, après application du filtre (Fig. 28)

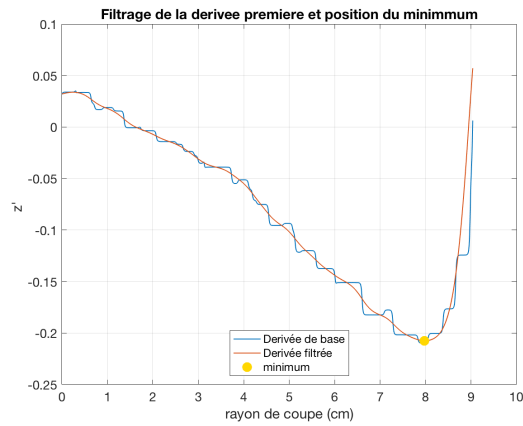
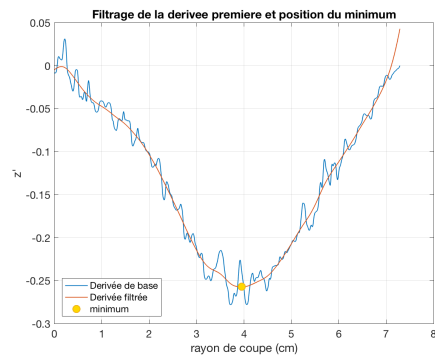
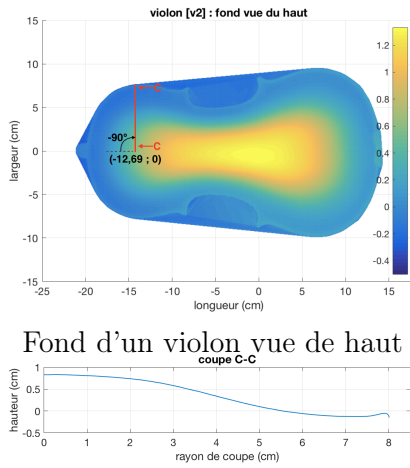


FIGURE 27 – Dérivée première de la coupe AA filtrée



dérivée première de la coupe C-C

coupe C-C

FIGURE 28 – Exemple d'une coupe avec oscillations fortes

Nous pouvons effectivement placer deux autres points par rapport au minimum trouvé afin de créer un intervalle de sécurité dans lequel le minimum se trouvera, sa position exacte ne pouvant pas être connue avec autant de précision. Afin d'avoir un intervalle adapté aux erreurs possibles (large dans le cas de fortes oscillations ou au contraire réduit si le minimum est trouvé avec plus de certitude). Celui ci doit dépendre de l'amplitude et de la fréquence des oscillations de la dérivée sans filtre ou de la pente maximale obtenue après application du filtre. La solution la plus efficace étant la dernière énoncée, c'est celle qui a été retenue pour évalué notre intervalle.

Afin de prendre en compte l'imprécision possible lors du calcul du minimum, nous avons utilisé un intervalle encadrant une certaine borne d'erreur en fonction de la pente maximale de la dérivée. Pour illustrer cela nous pouvons reprendre la dérivée de la coupe précédente (figure 28) en faisant un zoom sur les minimums trouvés (voir figure 29).

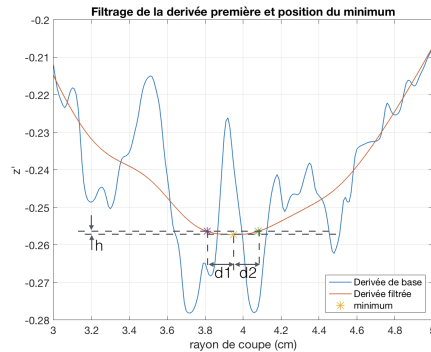


FIGURE 29 – Zoom sur la dérivée autour du minimum - Coupe C-C

Il faut maintenant trouver le bon rapport intervalle-pente maximale afin d'avoir un bon compromis entre un intervalle très fiable mais trop grand pour être vraiment significatif et, au contraire, un intervalle trop précis pouvant être sujet à une erreur importante. Après quelques tests, nous avons fixé la hauteur h sur la figure 29 à $1.5 * z'_{max}$ avec z'_{max} la pente maximale de la coupe. On obtient ainsi un intervalle de largeur $d_1 + d_2$ dans lequel le minimum se trouvera avec plus de certitude.

3.2.4 Résultats possibles

Nous sommes maintenant capables, grâce à la première fonction *ref.m* d'effectuer une coupe à une position et direction voulue, en conservant juste les points fiables issu du maillage d'origine et de son interpolation (les points indésirables extérieurs à l'instrument étant correctement déterminées et effacés). La deuxième fonction *main.m* (Fig 19) utilise ensuite la coupe nettoyée obtenue pour déterminer la position des points caractéristiques (minimum-ragrayure, maxima des bordures, points d'inflexion) comme on peut l'observer sur les coupes suivantes où les trois points caractéristiques ont été représentés (figure 30).

On peut déjà faire deux remarques à propos de ces résultats.

La première concerne l'interpolation faite pour la table, en effet pour nos exemples précédents nous avons utilisé des fonds où toute la surface était connue via le maillage du fond entier. A l'inverse pour la table nous avons effacé certaines parties car celles ci étaient cachées par des éléments extérieurs comme la touche, le chevalet, le cordier et la mentonnière. Ces parties manquantes sont visibles sur la Figure 16 qui représente le reste de table à exporter en coordonnée de points. Les points calculés à ces endroits sont donc grossièrement approximés vu la taille importante des parties manquantes et ne doivent pas être pris en compte pour nos calculs. On peut ainsi voir sur la figure suivante (Fig. 31), représentés en rouge, des endroit très plats au centre suivant la longueur, contrairement

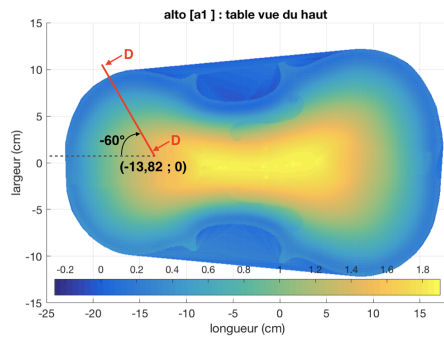
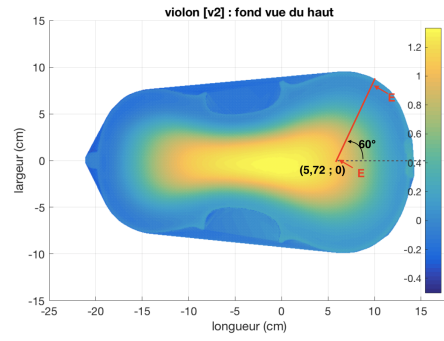
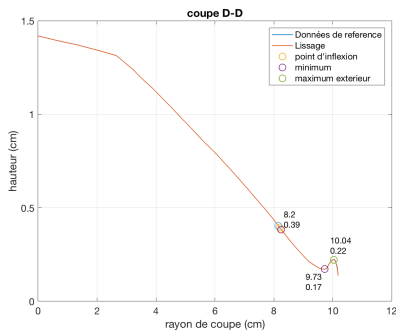


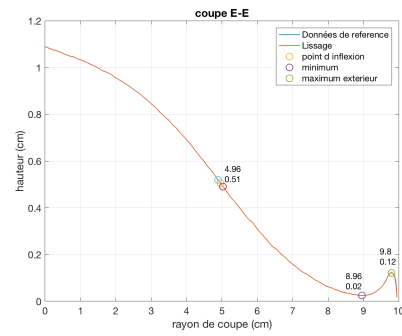
Table d'un alto vue de haut



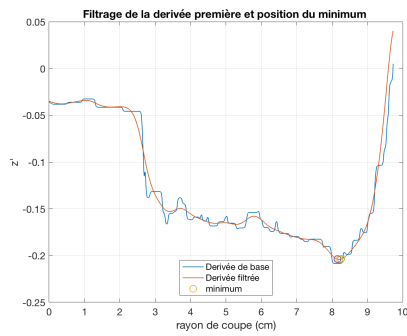
Fond d'un violon vue de haut



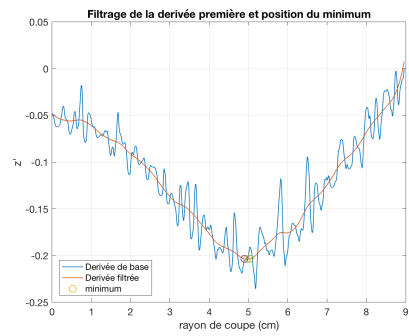
Coupe D-D avec position des points caractéristiques



Coupe E-E avec position des points caractéristiques



Pente de la coupe D-D



Pente de la coupe E-E

FIGURE 30 – Exemples de coupe avec position des points caractéristiques et sa pente pour 2 instruments

au fond et à l'instrument réel (table et fond) ou la courbure et l'arrondi sont bien visibles. Cette approximation des parties manquantes est à l'origine de la coupe assez particulière

obtenue précédemment (coupe D-D, Figure 30) composée d'une première partie très droite et un changement brusque de pente, et qui ne possède plus le changement de courbure continu qu'on retrouve pour toutes les coupes du fond (par exemple pour la coupe E-E, Fig. 30).

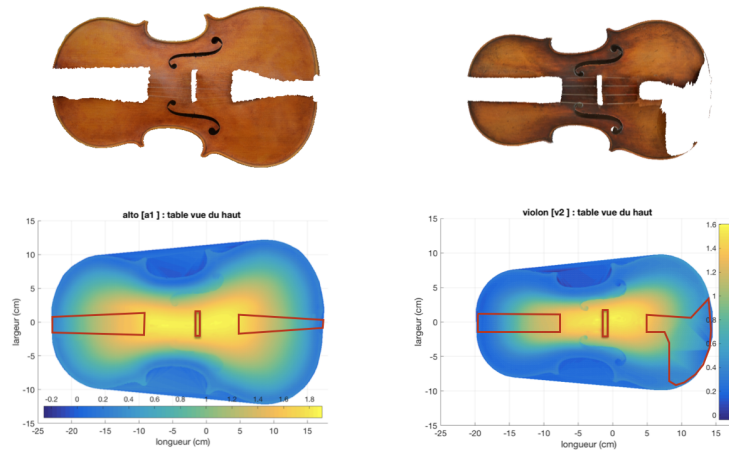


FIGURE 31 – Maillage utilisé pour la table et parties manquantes

Même si cette partie incertaine semble importante, notons toutefois qu'elle est très centrale et étroite. Le calcul des points caractéristiques n'est donc pas tellement touché par ce manque d'information comme nous pouvons le remarquer sur la coupe D-D de la figure 30. Nous avons effectivement un début de coupe D-D ressemblant à une droite de 0 à environ 2,6 cm (position d'une des parties manquantes de la table) avant d'être de nouveau bien définie et interpolée grâce au maillage d'origine.

Il faudra cependant faire attention à la fiabilité de certaines coupes, côté touche et côté cordier dont l'angle est fort proche de 0. Par la suite, nous considérons que les coupes effectuées entre -10° et 10° ne se basent pas sur des données assez fiables pour avoir des bons résultats et la position des points caractéristiques à ces endroits sera donc approximé grâce aux résultats, plus sûrs, trouvés aux alentours.

Cette solution s'applique aux instruments dont la mentonnière a pu être retirée durant la prise de photos (comme l'alto, Fig. 31, à gauche) si la mentonnière est présente, une nouvelle partie manquante doit être prise en compte. C'est le cas du violon Figure 31 (à droite). Les points caractéristiques situés entre les coupes côtés cordier de -60° à 10° devront être aussi approximer grâce aux points voisins.

La deuxième remarque est juste une première comparaison entre les deux instruments analysés ici. On observe des dérivées complètement différentes (première partie repré-

sentant le dessous de la touche mise à part). Afin de pouvoir renforcer cette première constatation nous avons utilisé les mêmes coupes sur la table de l’alto et du violon, celles ci sont visibles sur le graphe suivant (Fig. 32).

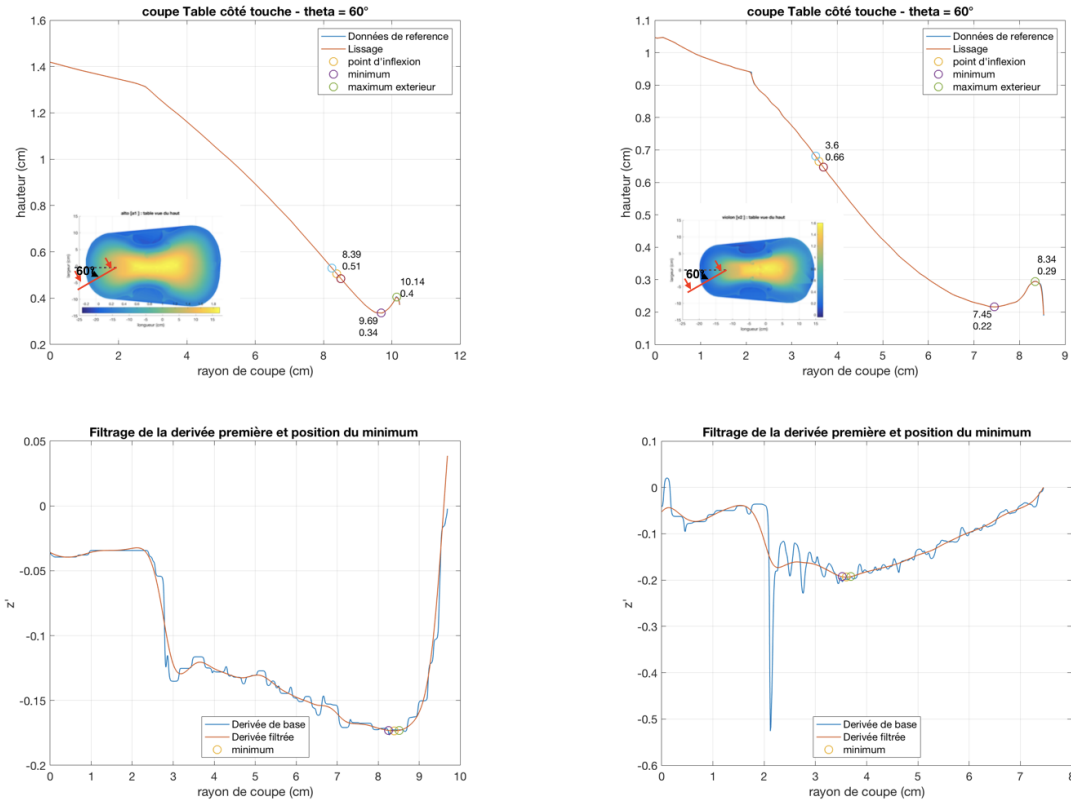


FIGURE 32 – coupe de la table côté cordier ($\theta = 60^\circ$) pour deux instruments différents

Nous avons bien deux coupes et surtout des dérivées premières, i.e. des pentes très différentes. En effet le minimum de la dérivée pour la coupe du violon est très central, contrairement à celui de l’alto, beaucoup plus proche de la ragrayure. La position du point d’inflexion est donc un facteur qui pourrait effectivement être un élément caractéristique de l’instrument.

Afin de ne pas se limiter à une simple comparaison coupe par coupe de différents instruments, une façon simple de représenter et comparer les résultats obtenus est présenté dans la prochaine section.

3.3 Présentation des résultats

3.3.1 Position des points caractéristiques

Le point de vue général (projection vue de haut avec hauteur) produit par notre programme nous donne déjà une bonne idée de la courbure de l'instrument. Cependant elle manque d'objectivité, aucune valeurs numériques et position des points calculés n'étant présentés.

Le but de la fonction *iso.m* est de représenter ces différents points sur toute la surface de l'instrument et de garder cette vue de haut très globale et facilement compréhensible.

Pour cela nous appliquons le choix des coupes décrites précédemment (Fig. 21) que nous avons reprise ici pour décrire les différentes coupes utilisées lors de l'exécution de cette fonction.

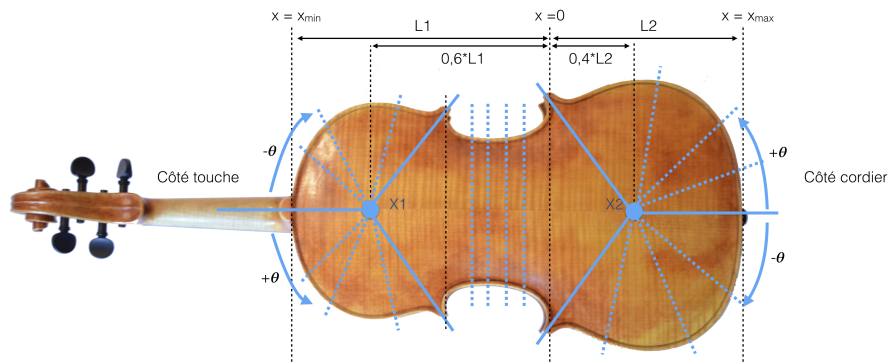


FIGURE 33 – Position des coupes utilisées

Le découpage de l'instrument se compose de trois parties :

La première consiste à faire des coupes côté touche avec un angle θ allant de -135° à 135° par pas de 1° qui, après quelques tests, s'avère être un bon compromis entre précision et vitesse d'exécution, un pas inférieur ne donnant pas de résultats plus significatifs.

La deuxième partie se base sur ce même procédé mais appliqué sur le côté cordier de l'instrument. Là encore, on calcule les points caractéristiques de coupe allant de -135° à 135° par pas de 1° .

Finalement, la troisième étape permet de trouver la position des points caractéristiques centraux. Pour cela nous appliquons des coupes transversales au niveau de l'échancrure comme représenté sur le schéma de la figure 33. Nous effectuons ainsi 12 coupes latérales réparties uniformément entre les dernières coupes des deux balayages angulaires.

Un exemple de résultat obtenu est présenté ci-dessous ; à gauche l’alto et à droite le violon déjà comparés au point précédent. Nous avons déjà pu observer une différence de courbure très forte entre les deux et un point d’inflexion beaucoup plus proche du bord pour l’alto. La vue globale nous confirme cette première impression sur tout l’instrument et permet de vérifier la fiabilité des calculs effectués sur les coupes, ceux-ci fournissant un résultat assez cohérent (forme reconnaissable et points assez proches) malgré quelques sauts concernant les points d’inflexions (figure 34 et 35).

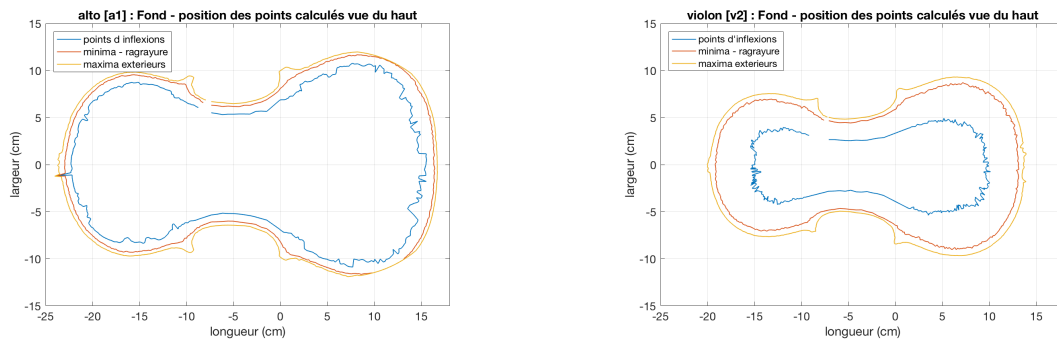


FIGURE 34 – Position des points caractéristiques pour le fond de deux instruments différents

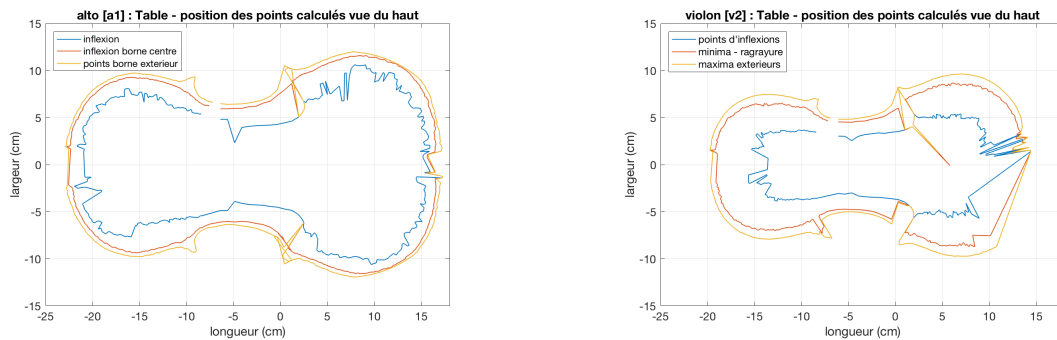


FIGURE 35 – Position des points caractéristiques pour la table de deux instruments différents

Comme énoncé précédemment, la table est sujette à un manque de données dû au maillage d’origine composé de parties manquantes. C’est pourquoi certains points doivent être rejetés (en particulier entre -10° et 10° côté touche et entre -60° et 10° côté cordier).

Une autre remarque que nous pouvons également faire à partir de ces graphes concerne l'intervalle de certitude utilisé pour localiser les points d'inflexion. Cette intervalle a été défini dans la *Section 3.2.3*. Le schéma permettant de le représenter est repris à la figure 36 avec un h proportionnel à la pente maximale.

Cette intervalle nous permettait ainsi de positionner avec plus de fiabilité les points d'inflexion. Malheureusement le point d'inflexion trouvé est assez central dans cet intervalle (les distances $d1$ et $d2$ représentées Fig. 36 sont presque égales pour les différentes coupes effectuées).

L'utilisation d'un tel intervalle n'apporte donc pas beaucoup d'informations supplémentaires. La figure 37 est un zoom sur la vue du haut représentant la position des points d'inflexion. L'intervalle de confiance a été représenté afin de montrer qu'il a bien la même forme que les points d'inflexion trouvés. Sa représentation sur les prochaines figures ne sera donc pas nécessaire. Nous nous contenterons de positionner les points d'inflexion calculés sans prendre en compte cet intervalle.

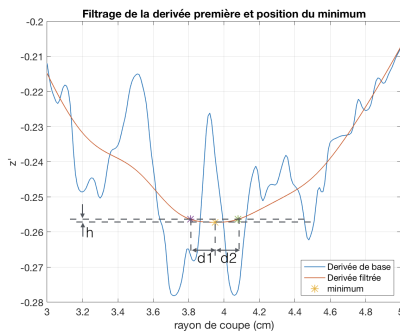


FIGURE 36 – Zoom sur la dérivée autour du minimum - coupe C-C (violon coupe à -90° côté touche)

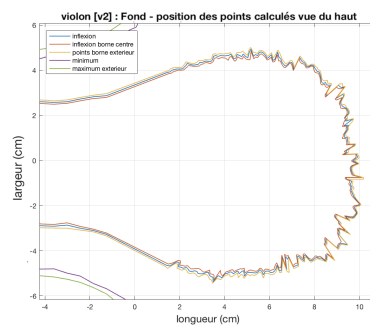


FIGURE 37 – Zoom sur les points d'inflexions obtenus (violon côté cordier)

Finalement nous avons un point de vue global beaucoup plus précis mais nous restons, là encore, sur une comparaison très visuelle. D'autres représentations de ces résultats, avec valeurs numériques, doivent donc être réalisés comme nous allons l'expliquer ci-dessous.

3.3.2 Balayage avant et arrière de l'instrument

Afin d'offrir une nouvelle approche plus précise et objective, nous avons récupéré les positions des points d'inflexion et des maxima extérieurs par rapport aux points minima pour des coupes angulaires allant de -135° à -10° et de 10° à 135° coté touche et coté cordier. Ces distances, mesurées horizontalement suivant la coupe et verticalement suivant z , sont représentées sur le zoom (Fig. 39) de la coupe A-A (Fig. 38).

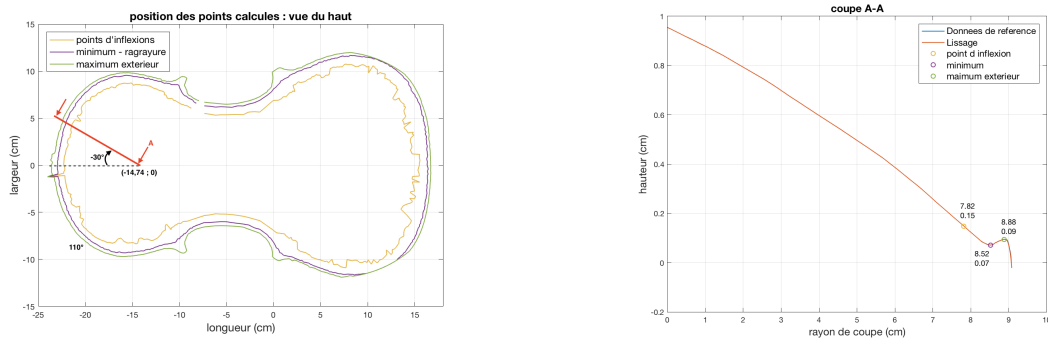


FIGURE 38 – Coupe A-A utilisé pour l'exemple

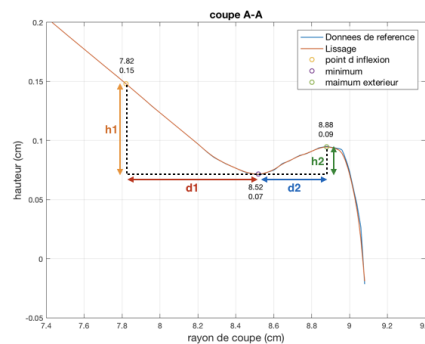


FIGURE 39 – Zoom sur la coupe autour des points calculés - distance d et h

Le saut de -10° à 10° permet d'éviter de se baser sur des points trop imprécis. Nous avons déjà procédé de la sorte auparavant pour la table où les parties cachées par la touche et le cordier pouvaient être grossièrement approximées et manquaient de précision. Dans le cas où la mentonnière est présente il faudra faire un saut de -60° à 10° pour le balayage côté cordier. Nos comparaisons seront basées sur les parties bien définies.

Comme pour le point précédent nous avons sorti des exemples de résultats obtenus pour un instrument

Comme on pouvait déjà le voir sur la vue de haut avec position des points caractéristiques (Fig. 34 et 35). Il subsiste quelques différences assez brusques de la position du point d'inflexion entre 2 coupes proches. C'est pourquoi nous utilisons une approximation de 10^{me} degré des points obtenus afin d'avoir une meilleure idée de la forme générale des courbes obtenues, lesquelles sont tracées ci-dessous (Fig. 40 et 41).

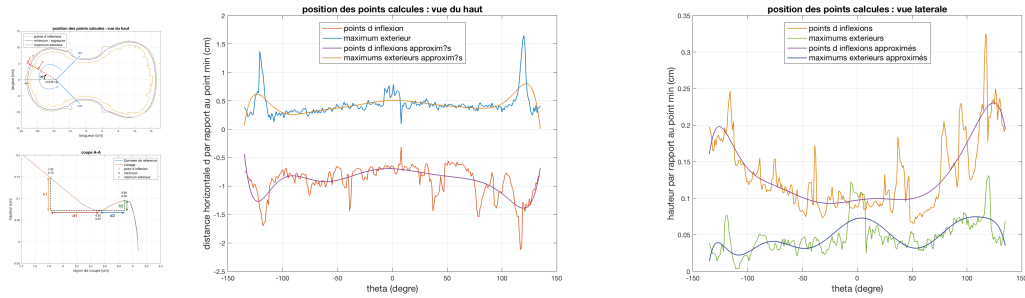


FIGURE 40 – Différence h et d pour un alto - balayage côté touche

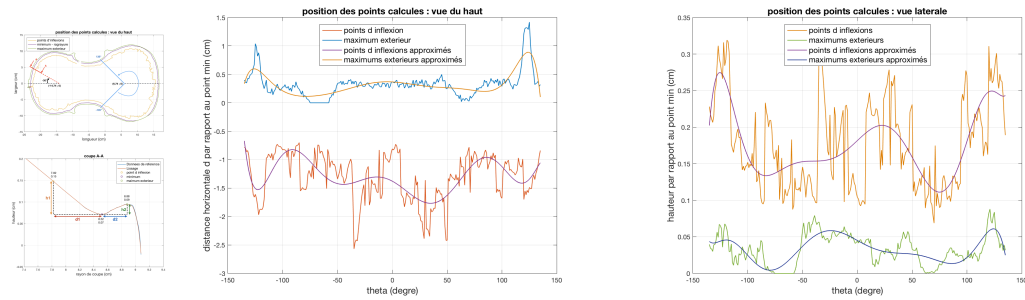


FIGURE 41 – Différence h et d pour un alto - balayage côté cordier

Même si cette approximation donne une bonne idée de la forme générale, elle est par endroit assez grossière. Nous allons donc développer nos résultats et comparaisons en prenant également en compte une autre transformation, plus ajustée sur l'ensemble des points obtenus, basée sur l'application d'un filtre de Solvay Stavisky. Le même exemple est donc repris ci dessous avec application de ce filtre (Fig. 42 et 43). Tout comme les filtres utilisés précédemment, le choix de celui-ci est justifié en annexe (Annexe C).

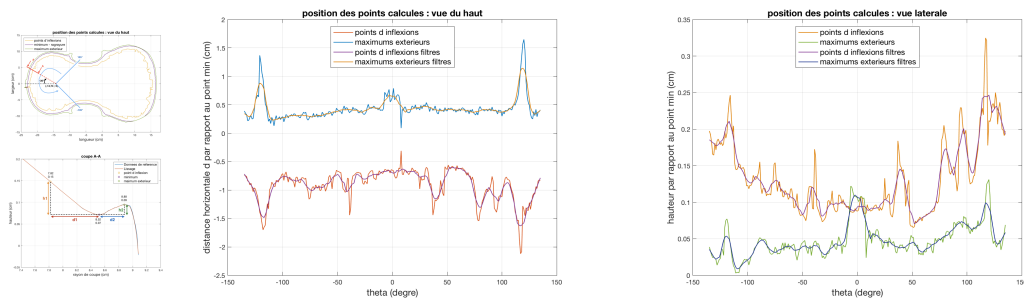


FIGURE 42 – Différence h et d pour un alto après application d'un filtre - balayage côté touche

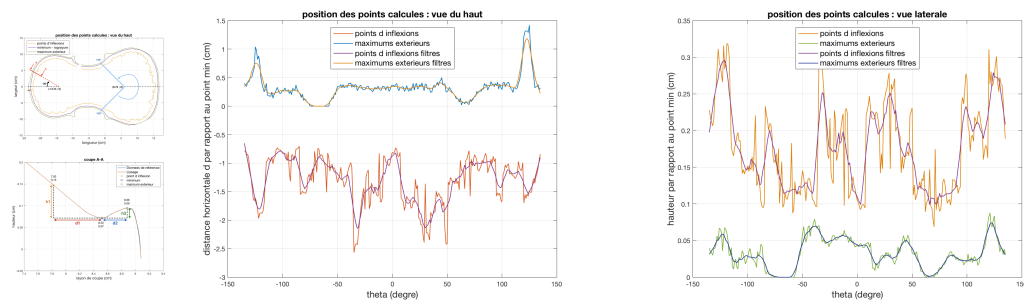


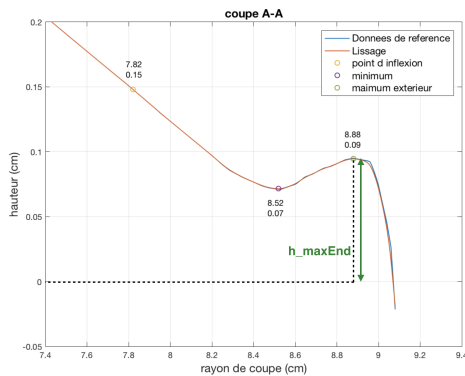
FIGURE 43 – Différence h et d pour un alto après application d'un filtre - balayage côté cordier

3.3.3 Plans caractéristiques

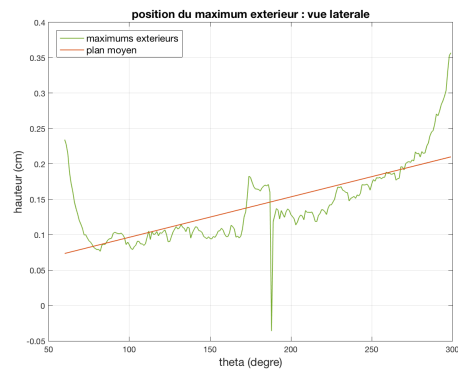
Toujours en se basant sur les points calculés précédemment, nous pouvons sortir un autre type de résultat. En effet plutôt que de représenter la position (distance dans le plan x-y et selon z) de chaque point (maximum extérieur et point d'inflexion) par rapport au minimum. Nous nous intéressons maintenant à la stabilité des points trouvés. Pour cela nous allons calculer les plans médiums formés par chaque type de points. Leur différence d'orientation sera ensuite affichée.

Pour illustrer l'idée de ce plan moyen nous avons tracé sur la figure suivante (Fig. 44) les hauteurs des points maxima extérieurs obtenus après un balayage côté touche allant de -120° à 120° . La droite rouge les traversant est une approximation du premier degré de l'ensemble de ces points. Nous appliquerons par la suite ce même procédé en 3D grâce à la position connus en x-y des points trouvés.

Cependant on remarque immédiatement que la droite obtenue a une pente non nulle, cela peut être du au fait que notre repère de référence, fixé lors des premières mani-



Zoom sur la coupe AA
distance calculée



Hauteur des points maxima extérieurs et
approximation

FIGURE 44 – Approximation 1er degré des points maxima extérieurs côté touche

pulations du maillage (*Section 3.1.2*) est placé assez précisément grâce à des éléments reconnaissables de l'instrument mais toujours à l'oeil nu, une légère erreur d'alignement et orientation peut donc subsister. De plus ces éléments ne représentent qu'une partie de l'instrument et ne peuvent pas être représentatif de l'instrument entier.

Pour éviter que cette légère orientation n'influence nos résultats nous allons prendre un plan de référence pour comparer l'orientation des différents plans formés. Les instruments recoupés étant généralement plus retouchés dans les zones (table et fond) proche de la touche et du cordier (*Section 2.2*), nous considérons que la partie centrale est la meilleure référence disponible. Nous allons donc comparer la différence d'orientation des 2 plans issus des points caractéristiques obtenus par balayage côté touche (plan Avant) et côté cordier (plan Arrière), par rapport au plan issus des points situés entre les pointes (plan Centre).

Ces différents plans sont représentés sur la figure suivante (Fig. 45).

La récupération des points caractéristiques sur l'ensemble de l'instrument reprend les étapes utilisées pour obtenir la position des points caractéristiques sur l'ensemble de l'instrument (*Section 3.3.2*).

Notons toutefois une petite différence par rapport aux balayages utilisés précédemment : en effet nous utilisons un balayage de -135° à 135° côté touche et côté cordier avec saut centrale dépendant des éléments indésirables de l'instrument (touche, cordier, mentonnière, talon ...). Ces balayages nous permettent de garder des coupes presque orthogonales par rapport aux éclisses. Nous gardons donc ces mêmes coupes, par contre nous les redistribuons afin de mieux définir nos 3 parties, en effet les coupes à 135° et 135° dépassent les pointes et empiètent fortement sur la partie centrale. Nous utilisons donc de nouvelles

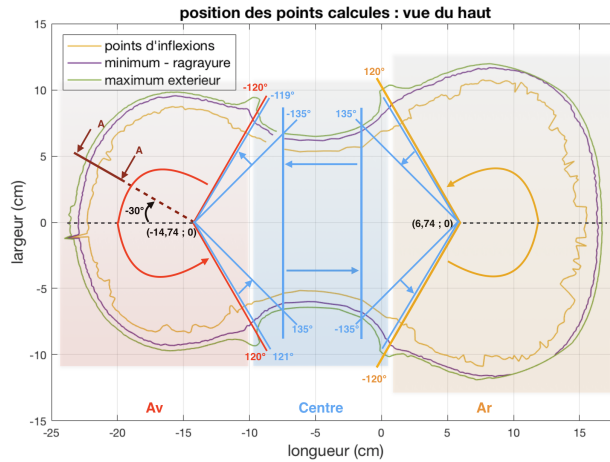


FIGURE 45 – Position des 3 plans caractéristiques

limites pour produire des plans aux frontières mieux définies. Le plan avant est ainsi formé par les points issus d'un balayage de -120° à 120° avec un saut central si nécessaire, il en va de même pour le plan arrière. Le plan central est formé par les points des balayages non utilisés, soit ceux obtenus avec des coupes de -135° à -120° et de 120° à 135° pour les deux côtés, et finalement des points centraux obtenus par coupes latérales.

Ces différents balayages sont également représentés sur la figure 45 avec les coupes extrêmes et le balayage effectué pour le calcul de chaque plan.

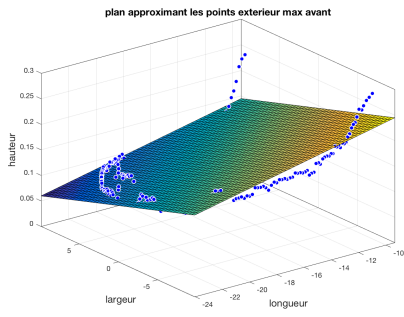
Les 6 figures suivantes (Fig. 46 à 48) représentent un exemple des plans obtenus en utilisant les points maxima extérieurs calculés via les balayages décrits précédemment. Les figures de gauche étant des vues en perspective tandis que celles de droite des vues de haut. Les points bleus, visibles lorsqu'ils sont situés au dessus du plan, représentent la position en coordonnées cartésiennes des points calculés.

Comme énoncé précédemment, c'est la différence d'orientation entre les plans avant et arrière par rapport au plan central qui nous intéresse. Nous avons donc récupéré les normales de ces 3 plans, représentés en vecteur unitaire partant de l'origine sur le graphe suivant (Fig. 49) afin d'observer ces différentes orientations.

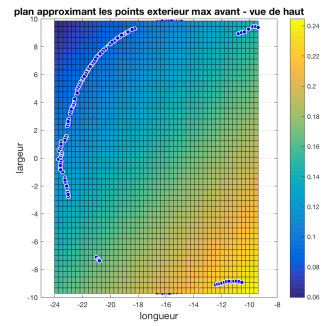
Cependant leur représentation en 3D n'est pas très significative, c'est pourquoi nous avons projeté ces normales dans les plans x-z et y-z.

Les résultats obtenus et la différence d'angle dans chaque plan sont tracés dans les figures ci-dessous (Fig. 70).

Nous avons juste pris les maxima extérieurs d'un fond d'alto comme base pour décrire les différentes étapes menant à l'affichage de ces résultats. Leur intérêt passe par une comparaison entre les angles obtenus pour le fond et la table de l'instrument. Il en va de

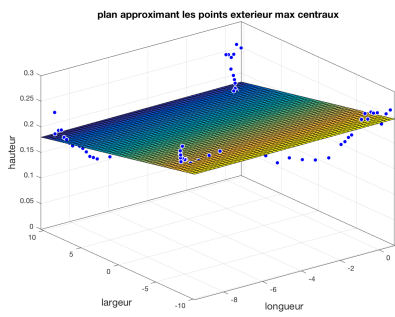


Vue en perspective

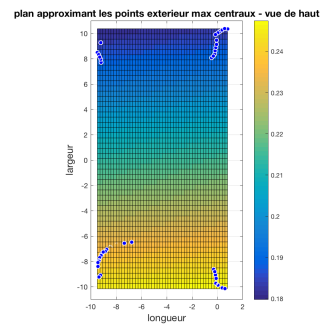


Vue de haut - projection sur le plan x-y

FIGURE 46 – Plan approxinant les points extérieurs max coté touche

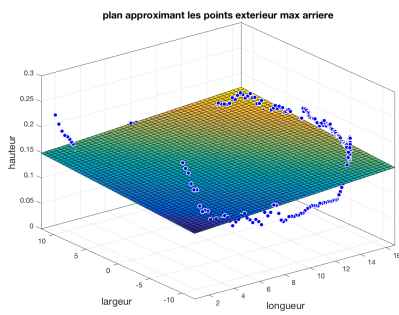


Vue en perspective

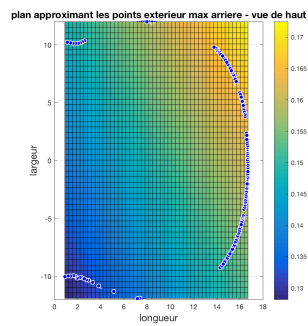


Vue de haut - projection sur le plan x-y

FIGURE 47 – Plan approxinant les points extérieurs max centraux



Vue en perspective



Vue de haut - projection sur le plan x-y

FIGURE 48 – Plan approxinant les points extérieurs max coté cordier

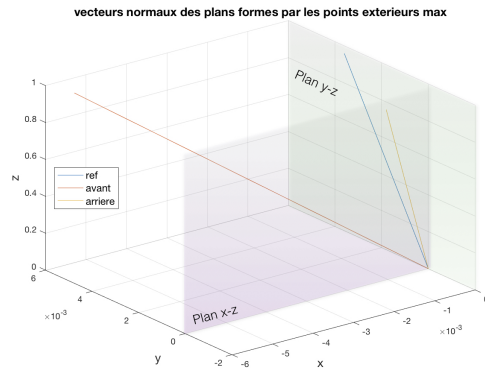
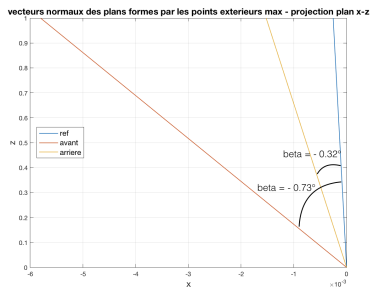
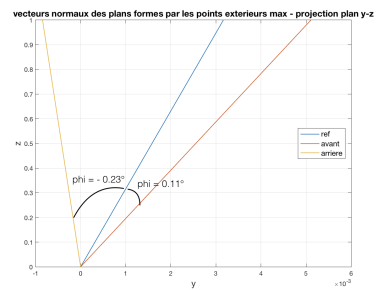


FIGURE 49 – Normales des plans obtenues



Normales obtenues
projection dans le plan x-z



Normales obtenues
projection dans le plan y-z

FIGURE 50 – Différences d'angles des normales obtenues

même pour les plans obtenus via les minima (plans issus de la ragrayure). Nous pourrons aussi les comparer entre eux (plans issus des maxima vs plans issus des minima) ou repérer l'apparition de résultats à caractères semblables pour différents instruments.

3.3.4 Parallélisme des pointes

Les dernières mesures affichées concernent le parallélisme des pointes. Elles consistent à afficher la différence de directions entre les pointes. En effet lors de la fabrication d'un violon ou d'un alto, le luthier essaie de garder ces pointes parallèles, au moins la pointe 1 par rapport à la 2, et la 3 par rapport à la 4 (la position de ces pointes sont représentées à droite de la figure 51), les vecteurs qui les forment doivent donc être presque colinéaires, une légère différence d'orientation étant inévitable. Être capable de mesurer cette différence est un point qui peut être réalisé afin de donner une information supplémentaire sur l'instrument.

Afin de récupérer les vecteurs formant ces pointes nous retravaillons à partir du maillage de base, déjà positionné dans notre repère de référence (les pointes ayant été effacées dans les maillages exploités précédemment, *Section 3.1.2*). Étant donné qu'il s'agit de récupérer 8 points sur le maillage, nous le faisons simplement via le logiciel en affichant les coordonnées des deux points les plus représentatifs pour reformer les pointes. Elles peuvent être en partie déformées lors de la génération du maillage, nous préférons donc sélectionner manuellement les points les plus réalistes et éviter de prendre en compte des erreurs importantes.

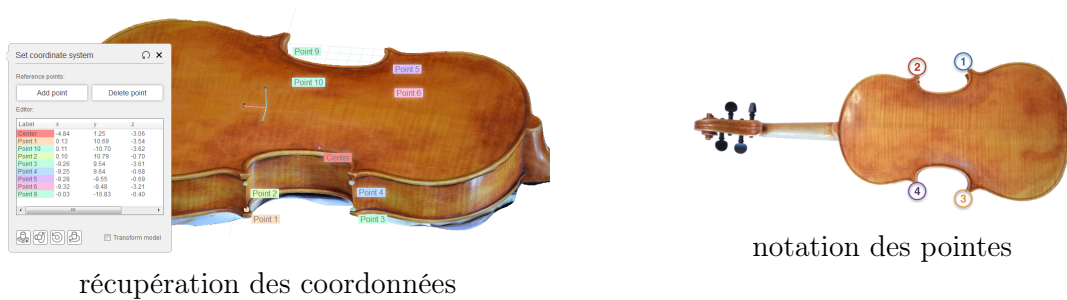


FIGURE 51 – Pointes et notations

Comme pour la comparaison entre les plans obtenues dans le point précédent (*Section 3.3.3*), nous avons tracé les 4 pointes dans une vue en perspective (Fig. 52) avant de les projeter dans les plans x-z et y-z. Ces projections nous permettent ainsi de facilement connaître la différence d'angle entre les pointes 1-2 et les pointes 3-4 selon ces deux plans.

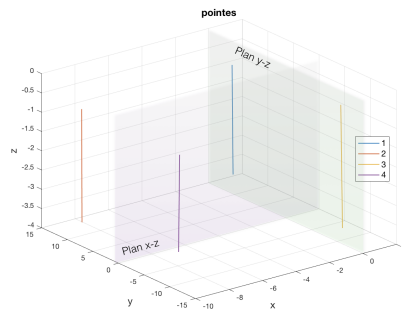
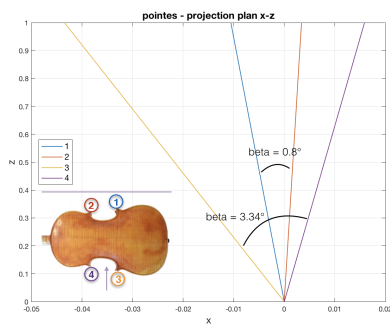
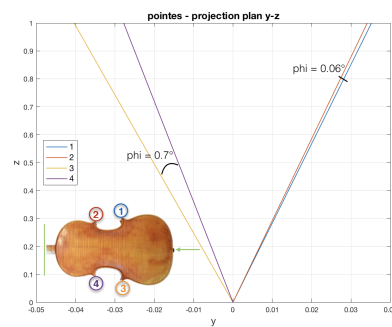


FIGURE 52 – différences d'angles des normales obtenues



vecteurs pointes
projection dans le plan x-z



vecteurs pointes
projection dans le plan y-z

FIGURE 53 – vecteurs unitaires donnant la direction des pointes et leur différence angulaire

4 Résultats

Nous allons maintenant appliquer ces calculs et récupérer ces résultats sur différents instruments. Afin de ne pas surcharger nos graphes nous afficherons les résultats obtenus pour 6 instruments différents (2 altos et 4 violons), leur références avec photos sont disponible à l'Annexe B. Les maillages utilisés, ainsi que ceux d'autres instruments, sont également accessibles via le lien donné en fin d'Annexe A,

4.1 Vue de haut

Nous commencerons donc par afficher les résultats donnant une vue globale de la courbure de la table et du fond.

Quatre graphes sont extraits pour chaque instrument. Ceux situés à gauche correspondent au fond et ceux à droite à la table (la première vue est la vue de haut projetée et la deuxième représente la position des points caractéristiques également vue de haut).

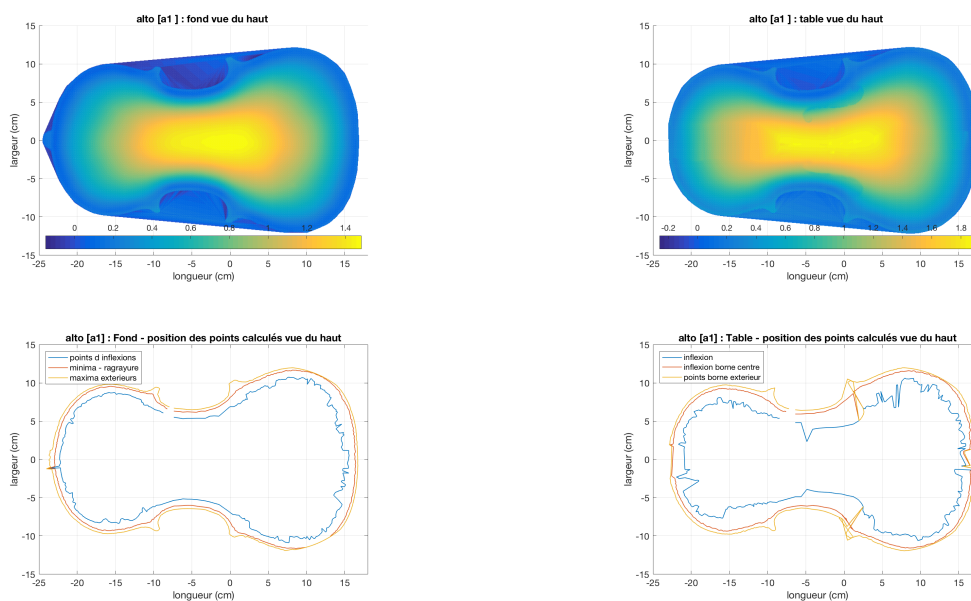


FIGURE 54 – Vue de haut d'un alto [a1]

Nous pouvons déjà prévoir certaines limites et conclusions possibles à partir de ce premier exemple (vue de haut d'un alto Fig 54).

En effet nous pouvons observer une certaine imprécision lors des calculs des points caractéristiques. Selon les différents types de points caractéristiques, l'origine de ces erreurs est différentes.

Par exemple pour les points d'inflexion, le problème a déjà été introduit *Section 3.2.3*, les courbes représentant la coupe et sa dérivée peuvent être sujettes à des imprécisions issues du maillages et des oscillations assez fortes. Appliquer un filtre sur ces deux données pour localiser le minimum de la dérivée est un bon moyen d'approcher le vrai minimum mais le résultat peut encore fort varier entre deux coupes.

L'utilisation d'un pas assez petit (1° entre 2 coupes) nous permettra d'avoir assez de points pour pouvoir approximer la distribution des points d'inflexion.

A côté de cette imprécision possible entre deux coupes, nous remarquons également des points d'inflexion situés beaucoup trop près des bords par rapport aux autres (pics bleus sur la Figure 55). Ils seront donc à rejeter.

La présence des ouïes peut également causer certaines erreurs entre les pointes. Les points d'inflexion pouvant être inexistant dans ces zones.

Malgré ces imprécisions, les vues du haut affichées nous permettent d'avoir une première idée de la forme générale de l'instrument et de sa courbure. Nous pouvons ainsi observer une certaine similitude entre la table et le fond pour chaque instrument.

Par exemple les points d'inflexion de l'alto [a1] sont très proche du bord sur tout le contour de l'instrument. Ils sont positionnés de manière semblable sur la table et le fond. Par contre, ceux du violon [v2] sont beaucoup plus centrés et suivent beaucoup moins la forme extérieure de l'instrument, on retrouve cette répartition plus centrale sur la table et sur le fond du violon [v2].

La courbure entre deux instruments peut donc fortement varier. Elle est caractérisé par la répartition des points d'inflexion, on retrouve une distribution semblable des points d'inflexion pour la table et le fond d'un même instrument.

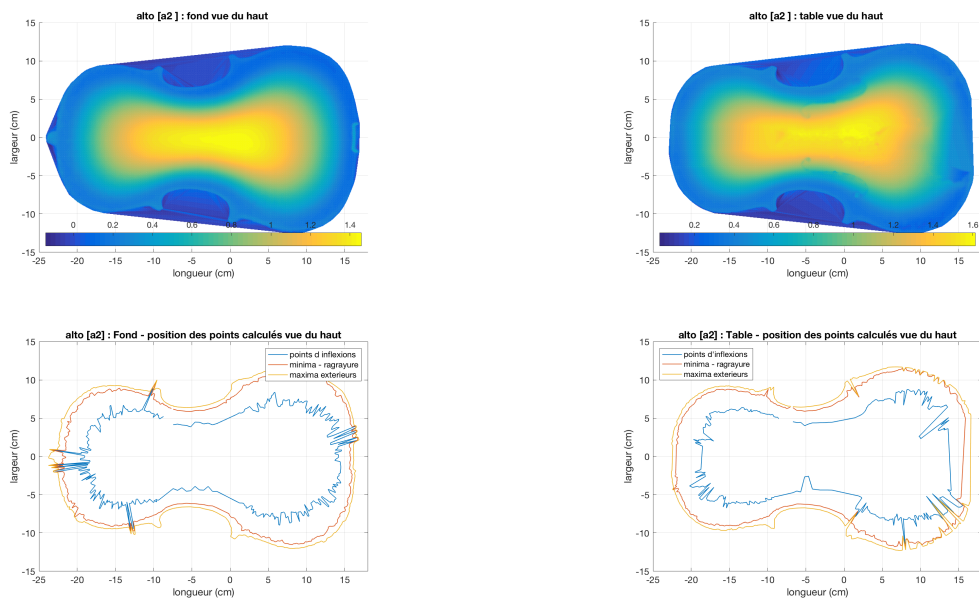


FIGURE 55 – Vue de haut d'un alto [a2]

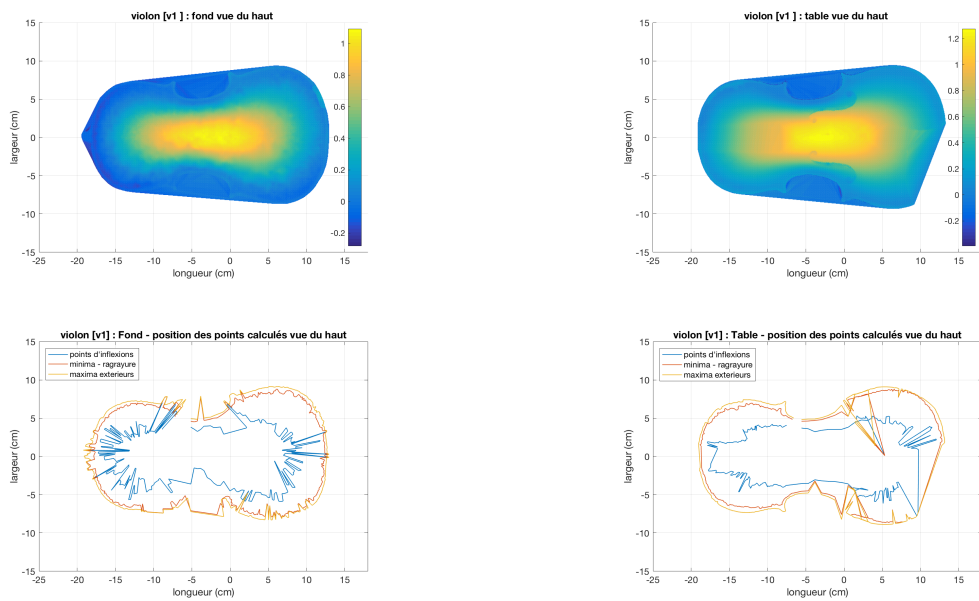


FIGURE 56 – Vue de haut d'un violon [v1]

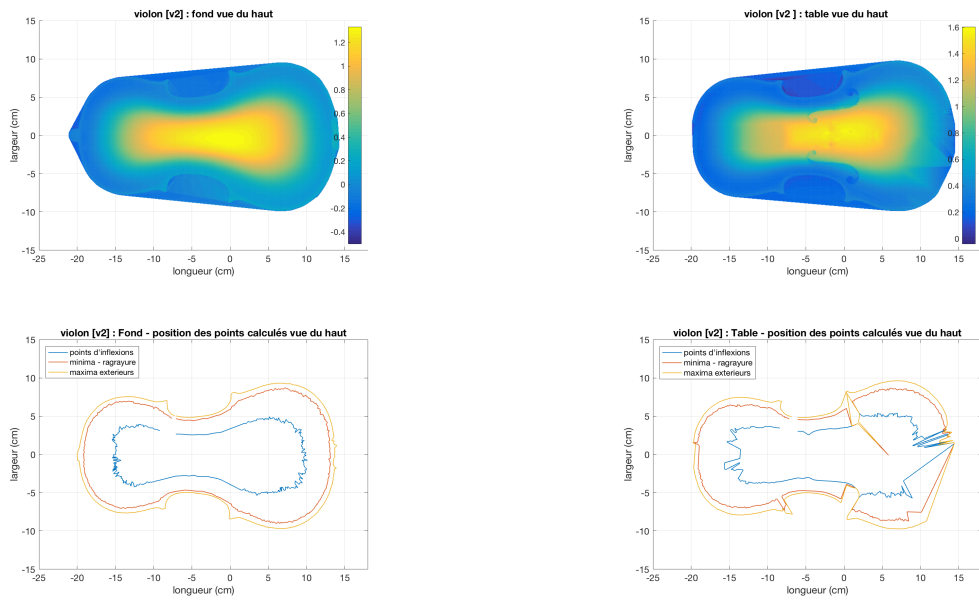


FIGURE 57 – Vue de haut d'un violon [v2]

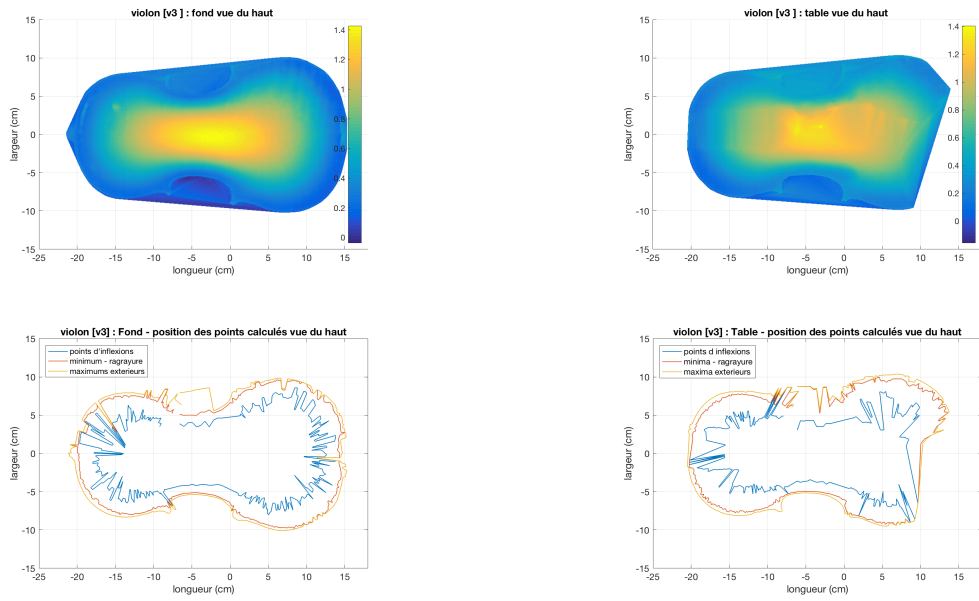


FIGURE 58 – Vue de haut d'un violon [v3]

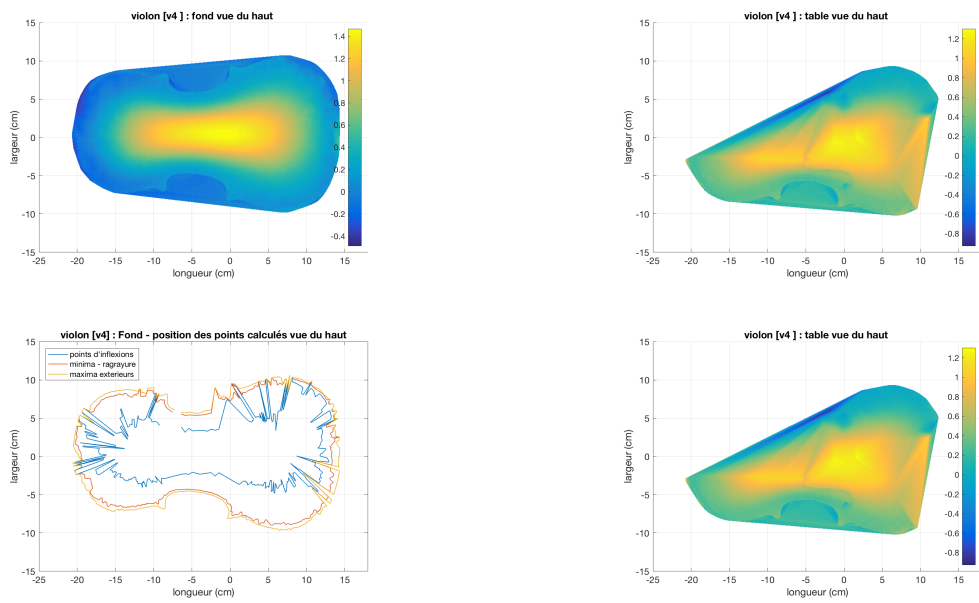


FIGURE 59 – Vue de haut d'un violon [v4]

4.2 Balayage avant et arrière

Comme énoncé dans la section 3.3.2 nous représentons maintenant l'allure des points caractéristiques de manière plus objectif grâce à la distance horizontale et verticale entre les points d'inflexion, les maxima extérieurs, et le minima.

Ces différentes distance sont représentés pour une coupe sur le schéma Fig. 60, repris de la section 3.3.2.

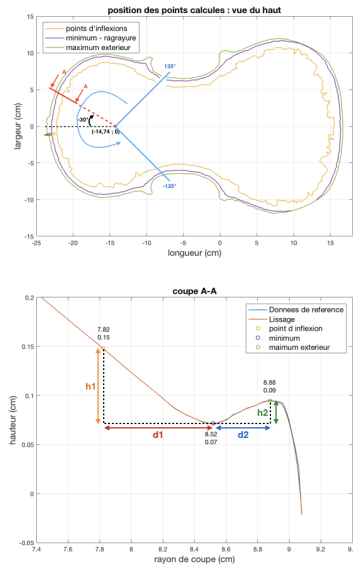


FIGURE 60 – Distances calculées : d et h

Nous calculons ces distances ($h1, h2, d1, d2$) pour chaque instrument et pour chaque côté (balayage 1 : Fond côté cordier, balayage 2 : Fond côté touche, balayage 3 : Table côté cordier et balayage 4 : Table côté touche).

Afin de pouvoir comparer facilement les résultats et trouver des caractéristiques communes aux instruments, les distances $h1$ obtenues avec le même balayage sur les différents instruments sont représentées sur le même graphe, il en va de même pour $h2$, $d1$ et $d2$. Cette opération est répétée pour les balayages 1,2,3 et 4. On obtient ainsi 4 graphes par type de balayage soit 16 graphes affichés de la Fig. 63 à la Fig. 68.

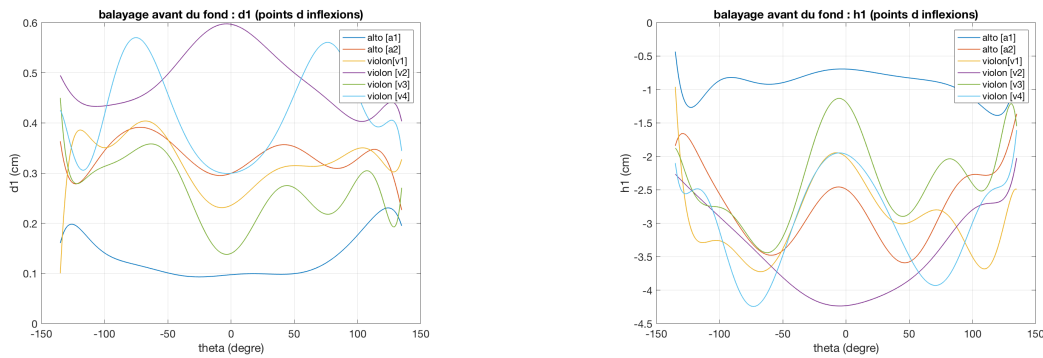


FIGURE 61 – Balayage angulaire du fond côté touche ($d1$ à gauche, $h1$ à droite) : position des points d'inflexion

Ce premier balayage (balayage du fond côté touche Fig. 63) nous permet de faire plusieurs remarques.

Tout d'abord on observe une certaine symétrie par rapport à l'axe central $theta = 0^\circ$. L'instrument étant symétrique suivant sa longueur, le résultat obtenu est cohérent avec celui attendu. La courbure de l'instrument donne également un certain rapport entre les distances $d1$ et $h1$ qui peut être observé en comparant les courbes du graphe de gauche et celles du graphe de droite. $h1$ est effectivement inversement proportionnel à $d1$ avec un facteur de proportionnalité dépendant de la courbure de l'instrument.

Concernant la forme générale des courbes, on retrouve un format assez semblable pour 5 instruments parmi les 6 utilisés ici. Sauf pour le violon [v2] nous avons des courbes avec oscillations composées de 2 maxima autour de -90° et 90° et un minimum autour du 0). Comme nous l'avons observé dans la *Section 4.1*, les points d'inflexion de l'alto [a1] suivent très fortement les contours de l'instrument, contrairement aux autres instruments qui ont des points d'inflexion plus centraux. Nous obtenons ainsi une courbe particulièrement plate pour l'alto [a1] avec une distance $d2$ plus importante lorsque l'on se rapproche des points.

Nous pouvons facilement voir le rapport entre ces vues et les vues de haut affichées précédemment (Fig. 54 à 59).

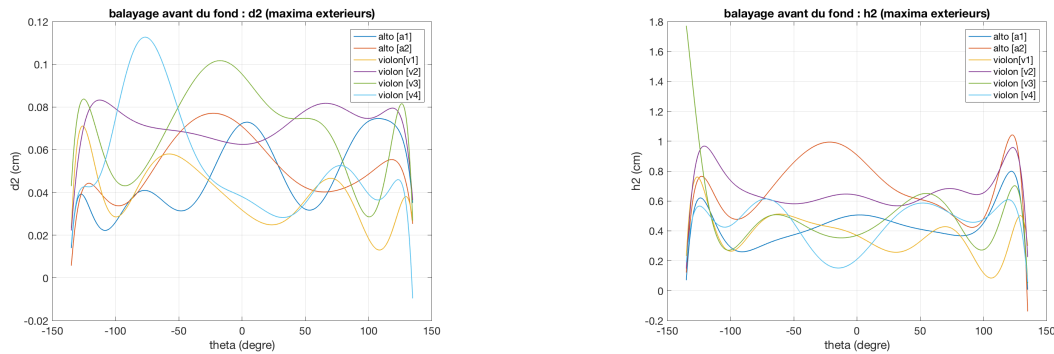


FIGURE 62 – Balayage angulaire du fond côté touche ($d2$ à gauche, $h2$ à droite) : position des points maxima extérieurs

Concernant la position des maxima extérieurs par rapport au minima, nous remarquons des distances $d2$ et $h2$ assez constantes, particulièrement pour $d2$ (Fig. 64). La différence de hauteur $h2$ est positive et importante par rapport à la distance $d2$, cela marque bien la présence de la ragraiture ($h1$ et $h2$ étant positifs nous avons bien une gorge avec une pente assez rude à la fin ($h2$ étant beaucoup plus grand que $d2$)).

Les remarques faites précédemment pour le balayage du fond côté touche s'appliquent également au balayage du fond côté cordier. Cependant les ressemblances sont plus dif-

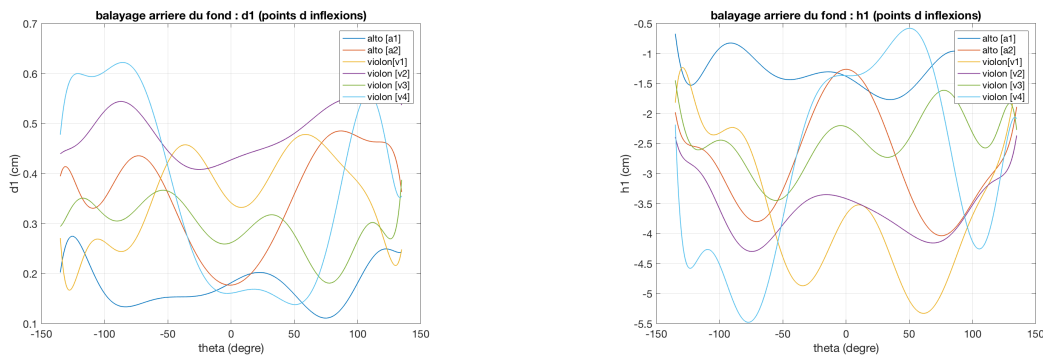


FIGURE 63 – Balayage angulaire du fond côté cordier ($d1$ à gauche, $h1$ à droite) : position des points d’inflexion

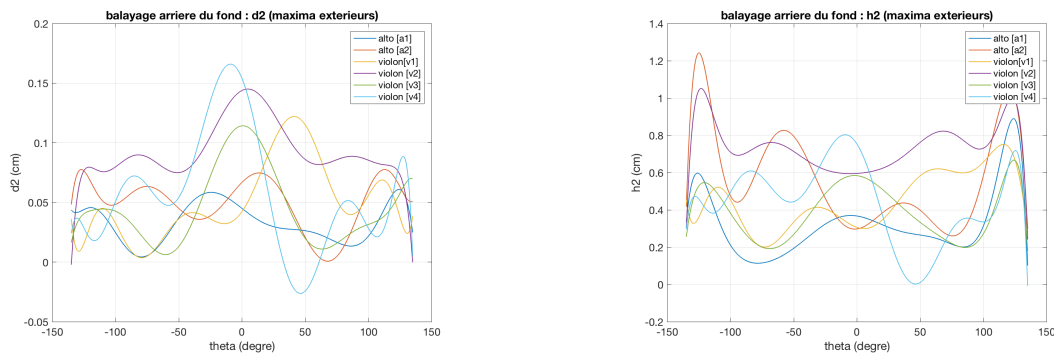


FIGURE 64 – Balayage angulaire du fond côté cordier ($d2$ à gauche, $h2$ à droite) : position des points maxima extérieurs

ficiles à observer. Les résultats obtenus pour le violon [v4] ne doivent pas être prises en compte, ils sont effectivement trop victimes d’erreurs (les points d’inflexion mal positionnés sont visibles Fig 59).

Concernant les balayages effectués sur la table de l’instrument, nous retrouvons bien une certaine ressemblance avec les résultats obtenus pour le fond. Cependant la table étant en partie non visible, les points obtenus sur certaines zones ne sont pas définis avec certitude (-10 à 10 ° côté touche et -60 à 10 ° côté cordier).

Finalement, comme nous l’avons remarqué précédemment sur les vues du haut (*section 4.1*), la courbure de l’instrument (position des points d’inflexion) peut varier fortement entre deux instruments, trouver des courbes généralisant celles obtenues pour $h1, h2, d1$ et $d2$ est donc difficilement réalisable. Ces graphes reprennent donc les résultats affichés sur les vues de haut en précisant la position des différents points (valeur numérique de $h1, h2, d1$ et $d2$). Ils apportent ainsi des informations supplémentaires (hauteur $h1$ et $h2$

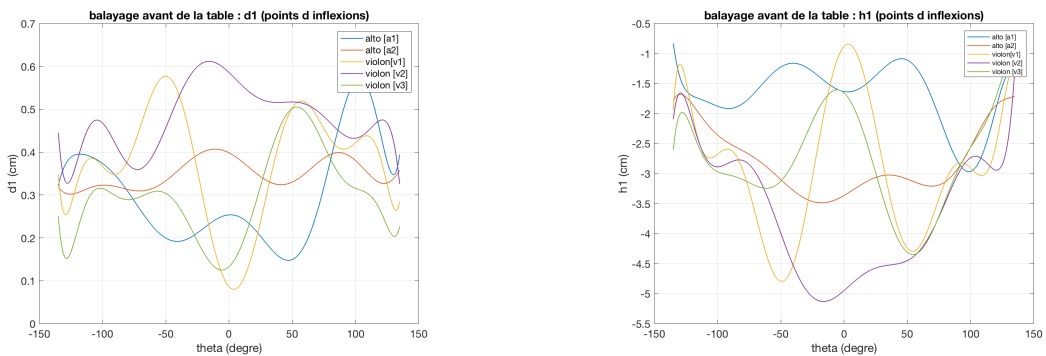


FIGURE 65 – Balayage angulaire de la table côté touche ($d1$ à gauche, $h1$ à droite) : position des points d'inflexion

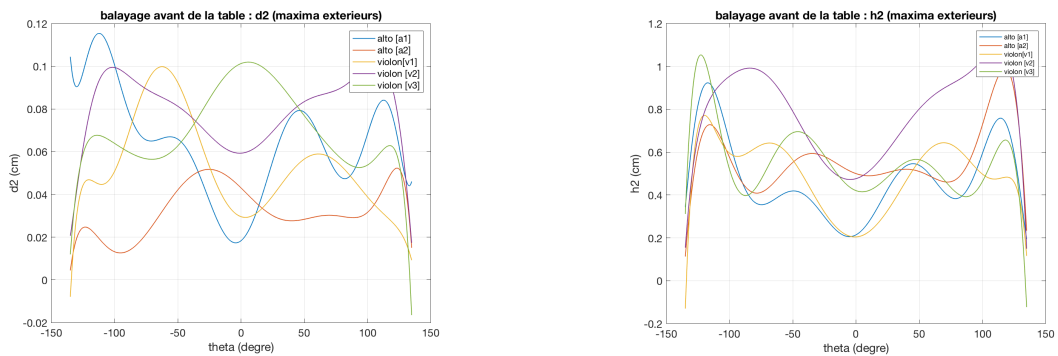


FIGURE 66 – Balayage angulaire de la table côté touche ($d2$ à gauche, $h2$ à droite) : position des points maxima extérieurs

non visible sur la vue de haut).

Cette nouvelle représentation des points caractéristiques est utile pour donner des informations plus précises sur un instrument : comparer sa table et son fond, mieux définir sa courbure ... Une généralisation des courbes trouvées ne sera pas réalisée ici étant donné que les courbes obtenues sont trop caractéristiques de chaque instruments.

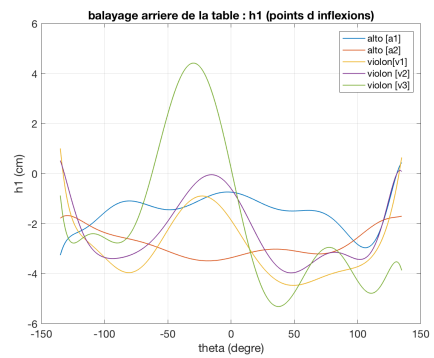
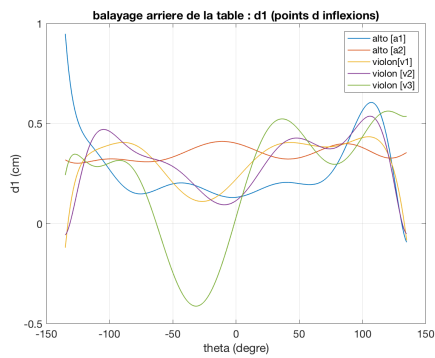


FIGURE 67 – Balayage angulaire de la table côté cordier ($d1$ à gauche, $h1$ à droite) : position des points d’inflexion

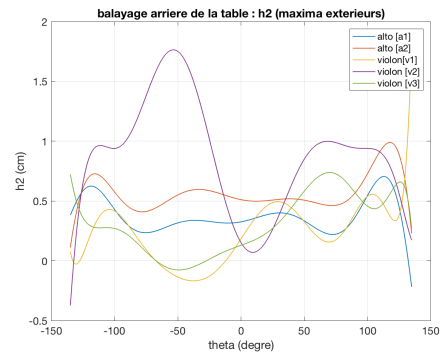
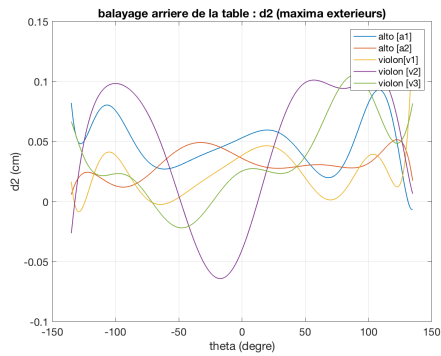


FIGURE 68 – Balayage angulaire de la table côté cordier ($d2$ à gauche, $h2$ à droite) : position des maxima extérieurs

4.3 Plans caractéristiques

Un autre type de résultats déduits de la position des points caractéristiques (en particuliers les maxima extérieurs et les minima) repose sur les plans formés par ces points et leur différence d'orientation. Les figures suivantes reprises de la *section 3.3.3* montre la différence d'angle obtenue entre les plans issus des maxima extérieurs coté cordier, coté touche et partie centrale de l'alto [a1].

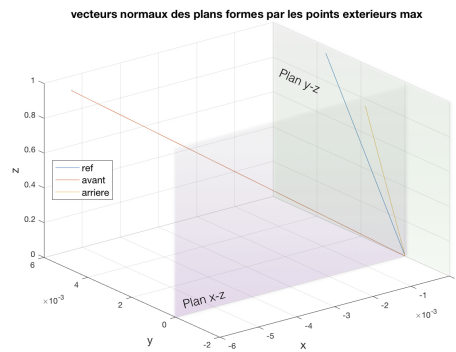
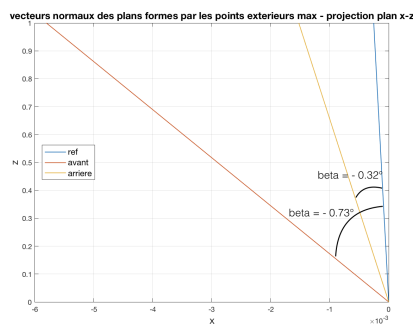
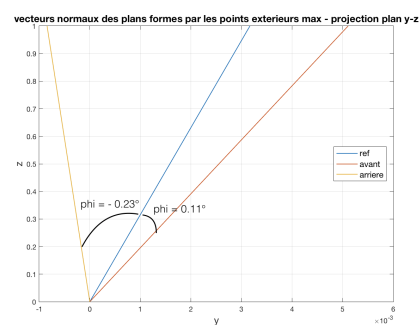


FIGURE 69 – Normales des plans obtenues



Normales obtenues
projection dans le plan x-z



Normales obtenues
projection dans le plan y-z

FIGURE 70 – Différences d'angles des normales obtenues

Afin de comparer facilement les résultats obtenus sur les différents instruments, nous avons représenté ces angles sur un même graphe. Nous avons récupéré les plans issus des minima côté cordier, côté touche et partie centrale. De même pour les plans issus des maxima extérieurs, côté cordier, côté touche et partie centrale. On obtient ainsi 6 plans différents pour le fond et 6 plans pour la table.

Les plans issus des maxima côté cordier et côté touche sont comparés à celui issu des maxima centraux, les différences d'orientations projetées dans les plans $x-z$ et $y-z$ sont respectivement définis par "plan Max : beta" et "plan Max : phi" dans les légendes. Il en est de même pour les plans issus des minima ("plan Min : beta" et "plan Min : phi").

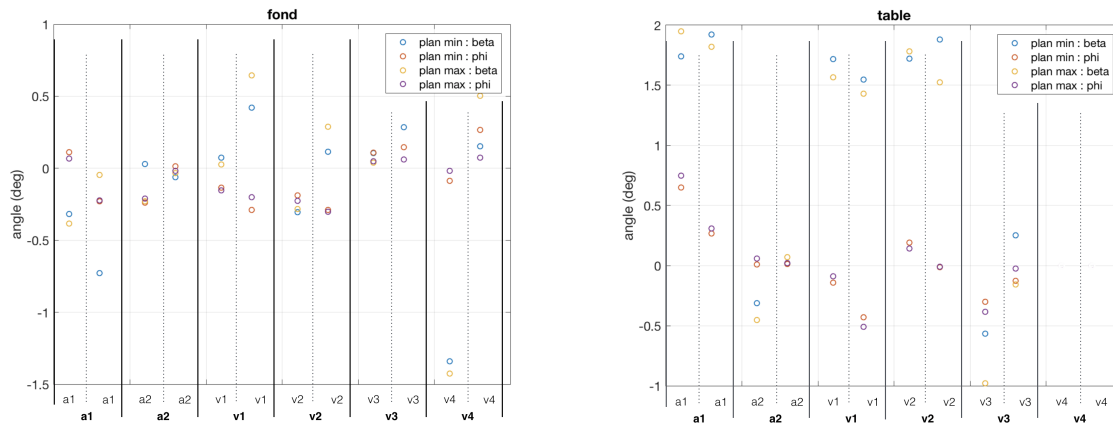


FIGURE 71 – Différence d'orientation entre les plans formés par les points caractéristiques (minima et inflexion) coté cordier, touche et central, pour le fond (à gauche) et la table (à droite)

Un rapport entre ces différents angles est difficile à observer. On peut tout de même remarquer une très faible différence d'orientation entre les plans. De plus pour chaque instrument on remarque que les "plan Max : beta" et les "plan Min : beta" sont forts proches, la même remarque s'applique pour les "plan Max : phi" et les "plan Min : phi". Les plans formés par les minima et ceux formés par les maxima sont donc très proches. Cette remarque est particulièrement visible avec les angles obtenus pour la table.

4.4 Parallélisme des pointes

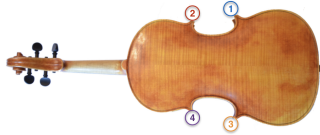


FIGURE 72 – Position des pointes

La méthode utilisée pour étudier le parallélisme des pointes a été décrite dans la *section 3.3.4*.

Le but est de déterminer la différence d'orientation entre les pointes 1 et 2, et entre les pointes 3 et 4 (localisées sur la Fig. 72).

Pour cela nous calculons la différence d'angle dans les plans $x - z$ et $y - z$ comme dans les figures suivantes (Fig. 73 et Fig. 74 reprises de la *section 3.3.4*). Ces résultats, obtenus pour les 6 instruments sont affichés sur la figure 75.

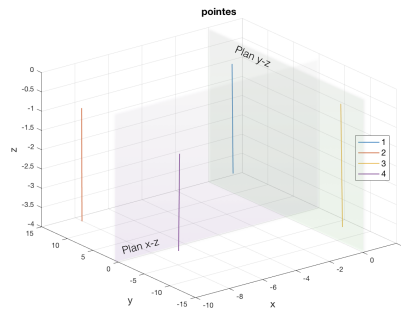
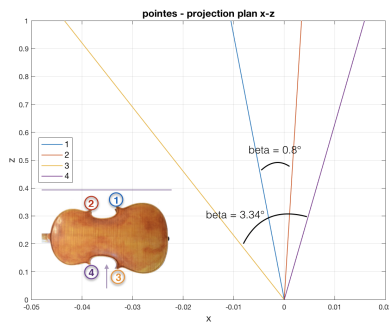
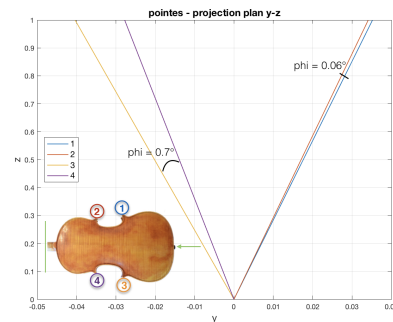


FIGURE 73 – Différences d'angles des normales obtenues



Vecteurs pointes
projection dans le plan x-z



Vecteurs pointes
projection dans le plan y-z

FIGURE 74 – Vecteurs unitaires donnant la direction des pointes et leur différence angulaire

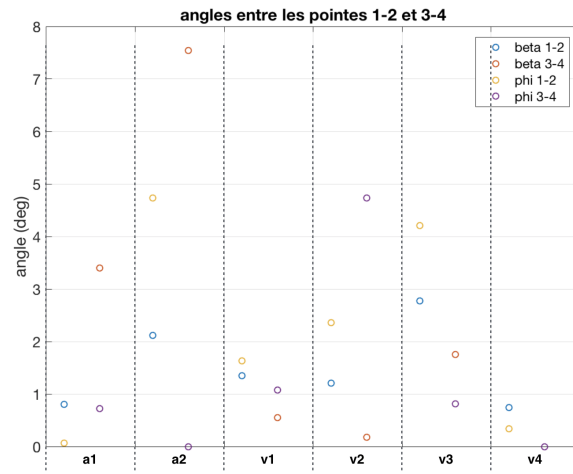


FIGURE 75 – Différence d’orientation entre les pointes 1-2 et 3-4

La différence d’orientation des pointes est propre à chaque instrument. Ces résultats donnent donc des informations particulières sur un instrument mais ne doivent pas être généralisés.

5 Conclusion

Le violon est un instrument ayant connu de nombreux changements depuis le *XVI^{ème}* siècle. Sa construction et sa forme actuelle sont le fruit de plusieurs siècles d'évolution. On retrouve aujourd'hui très peu de violons originaux du *XVII^{ème}* siècle, la plupart ayant été modifiés pour répondre aux nouveaux besoins des musiciens, ou ayant été victimes de falsifications. Afin de pouvoir analyser des violons et altos, nous avons conçu un outil permettant de donner des informations précises sur chaque instruments.

Vu la forme complexe de l'instrument, une bonne prise de mesure des différentes courbures est délicate. De plus, il doit être manipulé avec précaution, et les méthodes de mesure ne doivent en aucun cas abîmer l'instrument.

La tomodensitométrie est une solution possible pour récupérer la forme de l'instrument grâce à des coupes adéquates, l'intérieur de l'instrument étant également visible sur les scans obtenus. Il s'agit donc d'une solution permettant d'acquérir des données précises de l'instrument, intérieur compris. Cependant cette technique nécessite un certain budget, le scanner étant coûteux. Des arrangements pour utiliser des scanners d'hôpitaux peuvent être possibles. Ils sont cependant compliqués à mettre en place (scanners forts utilisés, ils doivent rester disponibles en cas d'urgence, des techniciens doivent être présents pour manipuler le scanner ...).

Le but de ce mémoire est ainsi d'aborder une nouvelle approche plus accessible pour prendre des mesures de l'instrument et vérifier que les résultats obtenus peuvent être exploitables.

Nous sommes effectivement capables, à partir de photos, de reconstruire numériquement l'instrument. Un environnement de calcul peut ensuite être utilisé pour obtenir la position de points caractéristiques.

Malheureusement comme nous avons pu l'observer sur les résultats obtenus, le maillage généré via le logiciel de photogrammétrie utilisé rencontre encore quelques défauts. Ces logiciels sont effectivement en pleine évolution et nous devons améliorer la précision des résultats en fonction des prochaines mises à jour.

Plusieurs pistes d'approfondissements sont possibles. Par exemple la comparaison entre les résultats obtenus en utilisant la tomodensitométrie et en utilisant la photogrammétrie. En améliorant la précision de la photogrammétrie, nous pouvons également analyser d'autres éléments du violon, comme la forme des ouïes (enregistrement de la forme des ouïes via des fonctions et comparaisons possibles entre elles) ou la forme de la volute. Il faudrait également appliquer les calculs effectués dans ce mémoire à un instrument probablement recoupé. Nous pourrions ainsi vérifier si une différence de forme entre les résultats issus de l'instrument recoupé et les résultats issus des instruments récents est bien visible.

Les prises de mesures et calculs mis en place dans ce mémoire constituent une nouvelle approche du problème. Elle rencontre encore certaines limites mais possède un bon potentiel. L'évolution des logiciels de photogrammétrie permettrait effectivement d'acquérir de meilleures mesures et résultats. La solution proposée ici pour facilement analyser et classer les instruments à archet (pour l'instant violons et altos) pourrait donc être une bonne solution à développer en fonction de ces logiciels.

Références

- [1] A.E. Ceulemans. *De la vièle médiévale au violon du XVIIe siècle. Etude terminologique, iconographie et théorique*. Tours, Centre d'études supérieures de la Renaissance - Turnhout, Brepols, 2011, 2002.
- [2] Claude Charlier. Rabâb, rebab, juin 2017. www.musicologie.org.
- [3] Claude Charlier. *Le violon*, juin 2017. www.musicologie.org.
- [4] et al. David D. Boyden. "violin." *Grove Music Online. Oxford Music Online.* oxford university press, 6 juin 2017. www.oxfordmusiconline.com.proxy.bib.ucl.ac.be:8888/subscriber/article/grove/music/41161pg1.
- [5] Médiathèque de la Cité de la musique. Histoire de l'instrument, juin 2017. www.mediathèque.cité-musique.fr.
- [6] Rodrigue Dona. *Histoire du violon*, juin 2017. www.dona-rodrigue eklablog.com.
- [7] kulturica. *La naissance du violon*, juin 2017. www.kulturica.com.
- [8] Frédéric Lainé. *Corpus pédagogique pour l'alto : Volume1, de Corrette (1773) à Elwart (1844)*. Mardaga, 2002.
- [9] K. Moens. *Les voix médianes dans l'orchestre français sous le règne de Louis XIV : les instruments conservés comme source d'information*. in Jean Duron et Florence Gétreau (dir.), *L'orchestre à cordes sous Louis XIV. Instruments, répertoires, singularités*, Paris, Vrin, 2015, p.119-139.
- [10] Musicafont. Présentation du violon, juin 2017. www.musicafont.org.
- [11] palomavaleva. violon, juin 2017. palomavaleva.com.
- [12] A. Tolbecque. *L'art du luthier*. Niort, l'Auteur, 1903.
- [13] Encyclopaedia Universalis. *Dictionnaire des Instruments de musique*. Encyclopaedia Universalis France, 2016.
- [14] S. Zamoun. Création d'un violon, juin 2017. www.luthier-violons-33.fr.

A Protocole prise de photo

A.1 Autodesk Remake



La procédure décrite ici est à suivre avec le logiciel Autodesk Remake. Il est disponible gratuitement pour les étudiants et institutions au lien suivant (une version d'essai est également disponible) :

<http://remake.autodesk.com/try-remake>

Un compte Autodesk est nécessaire pour pouvoir utiliser le logiciel. Il peut être créé via le lien :

<https://accounts.autodesk.com>

A.2 Prise des photos

Afin d'obtenir des résultats satisfaisants, nous allons générer un maillage pour la table et un maillage pour le fond.

Nous avons d'abord essayer d'obtenir un seul maillage de l'instrument en entier mais cela n'a pas donné de résultats concluants.

Les violons et altos que l'on désire prendre en photos sont des instruments fragiles avec des vernis délicats. Les poser à plat ou en position instable sur une surface dure sont donc à éviter. Nous utilisons alors un support simple afin de poser l'instrument de façon stable et sûr le temps de la prise de photos.

A.2.1 Support



FIGURE 76 – exemple de support

Le support utilisé ici (Fig. 76) est une simple boîte à chaussure, découpée de façon à éviter de toucher les cordes, touche, mentonnière et tendeur lorsque l'instrument repose sur sa table (Fig. 77). Les bords de la boîte sont entourés de mousses afin d'améliorer le contact instrument-support. Le coloris blanc est utilisé pour obtenir un meilleur résultat, le logiciel reconnaît ainsi plus facilement les contours de l'instrument et produit un maillage plus précis.



FIGURE 77 – contact entre la table et le support

A.2.2 Photos

Afin d'avoir des bons résultats, il est conseillé de faire "3 tours". L'instrument est posé sur son support, sur une table, et nous allons prendre des photos à 3 hauteurs différentes en faisant tourner l'instrument entre chaque photo (environ 10 photos par hauteur). L'appareil photo conserve une place fixe lors de ces tours, tandis que l'instrument tourne. Pour que le logiciel ne soit pas perdu avec des arrières plans non cohérents entre les photos, il faut limiter au maximum la présence et la netteté de cet arrière plan. Nous pouvons soit utiliser un fond blanc, soit une ouverture de diaphragme permettant de flouter l'arrière plan, la table et le fond doivent rester bien nets sur toute la photo. L'avantage de bouger l'instrument et non de tourner autour avec l'appareil est une prise de photo plus facile et rapide à réaliser, il permet aussi d'obtenir de meilleurs résultats en évitant des changements de luminosité et de couleur d'une photo à l'autre.

Les 3 hauteurs sont représentées ci-dessous (Fig. 78 à Fig. 80) Les figures de gauches représentent la prise de photos pour la table, celles de droite la prise de photos pour le fond.



FIGURE 78 – 1^{er} tour : vue proche de la vue de haut



FIGURE 79 – 2^{me} tour : vue proche entre celle du haut et de profil



FIGURE 80 – 3^{me} tour : vue proche de la vue de profil

Les photos doivent être prises sans flash et une lumière naturelle est conseillée. Il faut éviter également toute photo où le vernis est trop brillant, la position du brillant n'étant pas la même d'une photo à l'autre, le logiciel n'a plus de bon repère et mélangera les vues (cf *Section A.4*).

A.3 Création du maillage à partir des photos

Une fois les photos prises, un rapide passage par le logiciel Autodesk Remake permet de lancer la génération du maillage. Il suffit de cliquer sur l'icône "create 3D" (Fig. 81) et suivre les étapes proposées par le logiciel. 81.

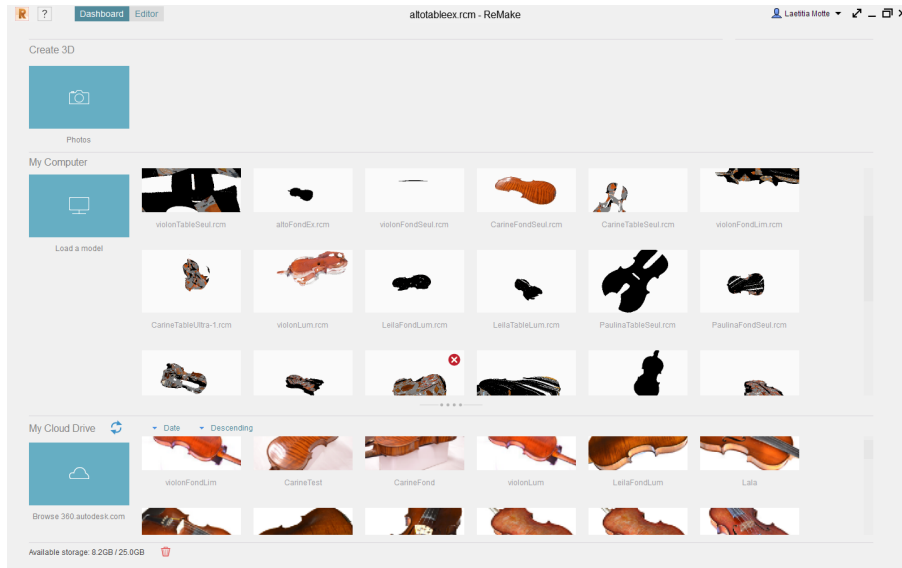


FIGURE 81 – Capture d'écran : accueil

A.4 Retouche et choix des photos

Il suffit parfois d'un brillant mal placé sur deux photos pour obtenir un maillage inexploitable. La première étape est donc de vérifier si des brillants trop importants n'apparaissent pas sur plusieurs photos à des positions différentes.

La figure 82 montre un maillage loupé, formé à partir d'un set de photos comprenant les deux photos à sa droite.

Avec une meilleure sélection des photos utilisée pour générer le maillage (les photos non sélectionnées sont grisées sur la figure 83), on peut éviter ce mélange de vue et obtenir un résultat plus satisfaisant (Fig. 83, à droite).



FIGURE 82 – Exemple de maillage loupé à cause du brillant

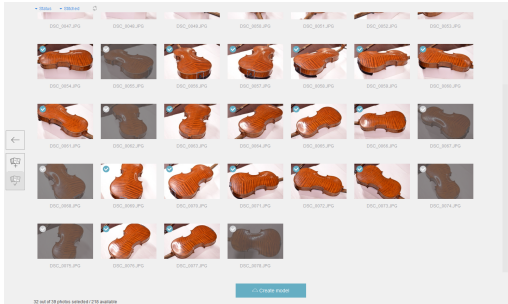


FIGURE 83 – Sélection des photos et nouveau maillage obtenu

Des réglages à appliquer directement sur les photos permettent également d'améliorer la qualité du maillage, par exemple : effacer l'arrière plan ou surexposer légèrement les photos.

Plusieurs exemples de maillages ainsi que les photos utilisées pour les générer sont disponibles au lien Dropbox suivant :

"https://www.dropbox.com/sh/4pda3oj0t19q8pv/AAASGXw_UR9wpKmcBm_zLoi6a?dl=0"

B Instruments utilisés

[a1] G. Sambot-Szpanbok, Rouen, mars 2009

[a2] Adam Wioletta Stalmach, Ledziny k. Katowic, Ad 2008

[v1] A. Salvator, Paris, J.T.L

[v4] Antonius Stradi Grenonenfis, Faciebat Anno 1721

Les références des violons [v2] et [v3] ne sont pas disponibles. Des photos de chaque instruments sont affichées ci-dessous.



FIGURE 84 – alto [a1]



FIGURE 85 – alto [a2]



FIGURE 86 – violon [v1]



FIGURE 87 – violon [v2]



FIGURE 88 – violon [v3]



FIGURE 89 – violon [v4]

C Code Matlab

Le code Matlab utilisé est disponible via le lien suivant :

<https://www.dropbox.com/sh/x4bxfq5pt5g2ajp/AAAaLH3bfsBOZtlEiOeKjgR7a?dl=0>

Les fonctions ayant permis de tester différents filtres sont également disponibles suivant ce lien.

