

LE VIOLON : STRUCTURE MÉCANIQUE À RÉSONANCE SENSIBLE

X. Boutillon

Laboratoire d'Acoustique Musicale, CNRS, Université Paris 6 et Ministère de la Culture,
Boîte Courrier 161, 4 place Jussieu, F75252 Paris Cedex 05.

1. INTRODUCTION

Les recherches acoustiques sur le violon commencent au début du 19ème siècle et ont mobilisé quelques célébrités du monde de la physique (Helmholtz, Raman). Plusieurs études bibliographiques complètes existent sur les centaines d'articles parus. Hutchins [1] dresse un panorama historique sur les investigations acoustiques menées sur 2 siècles (188 références). A travers un inventaire brillant et perspicace des problèmes acoustiques et psychoacoustiques posés par les instruments à cordes frottées, McIntyre et Woodhouse [2] font le point en 1977 des connaissances acquises, en particulier sur la mécanique de la corde frottée (80 références commentées, essentiellement sur les 20 années précédant la publication). Deux ouvrages de compilation [3] des publications majeures dans le domaine ont été édités par Hutchins en 1977 et un magistral ouvrage de synthèse a été écrit par L. Cremer [4] sur l'acoustique du violon en 1981, y présentant à la fois les nombreuses recherches menées par lui-même et ses étudiants et, de manière très fouillée, les résultats sur le domaine les plus récents à l'époque. Il faudrait également mentionner un nombre considérable de publications techniques (les plus récentes par Barlow et Woodhouse utilisent avec profit la microscopie électronique à balayage) sur les vernis et d'autres adjuvants utilisés avec les bois de résonance ou sur les bois et les conditions de leur mise en œuvre (traitements, influence de l'humidité, etc.). Nombre de ces études ont paru ou sont commentées ou recensées à côté d'études acoustiques dans *The Journal of The Catgut Acoustical Society* [5].

Le propos ici n'est pas de résumer encore plus succinctement que mes prédécesseurs des recherches aussi variées mais de mettre l'accent sur les études les plus notables - au risque de subjectivité - parues dans les dernières années, en reprenant les acquis principaux des recherches antérieures.

Le violon (figure 1) se présente comme une boîte - la caisse - constituée par une *table d'harmonie* et un *fond* solidarisé par des *éclisses*. Symétrique en apparence, la structure du violon a un comportement vibratoire fortement influencé par les deux éléments cachés que sont l'*âme* et la *barre de table*. Placée sous le *pied* du chevalet situé du côté des cordes aiguës, l'*âme* est un mince cylindre de bois coincé entre la table et le fond. La barre de table est un long raidisseur, collé à la table parallèlement aux cordes, sous l'autre pied du chevalet. La table et le fond sont aussi couplés par les *éclisses*. Il n'y a pas de manière standard de tenir le violon, que ce soit à fins de jeu ou d'expérimentation, et les éléments rajoutés (mentonnière, coussinet) ou les dispositifs de fixation altèrent toujours légèrement ses propriétés vibratoires.

Les formes et la construction d'un violon s'expliquent en partie par des considérations pratiques très simples. Ainsi, le chevalet doit-il être arrondi afin qu'on puisse ne frotter qu'une seule corde à la fois, les C des éclisses permettent le passage de l'archet lors du jeu sur les cordes extrêmes, etc. Comme pour tous les objets fabriqués par des artisans, des considérations esthétiques

LE VIOLON : STRUCTURE MÉCANIQUE À RÉSONANCE SENSIBLE

viennent également se superposer à ces nécessités fonctionnelles. Ainsi, il serait préférable de ménager un creux dans le profil de la caisse pour le passage du bras lors du jeu en position d'extrême aigu ; une telle conception rompt la symétrie apparente de l'ensemble et les altos (où le problème est spécialement critique) conçus ainsi n'ont pas eu beaucoup de succès, alors que leurs qualités musicales n'en avaient pas pâti.

Le parti esthétique a fait traiter la forme du violon comme une véritable pièce d'architecture avec le même souci d'équilibre des surfaces et des volumes, exprimé dans les termes de leur époque. Ainsi, l'invocation du nombre d'or et d'autres considérations numérolologiques, l'importance accordée à certaines lignes génératrices dans les tracés, sont courants dans la manière d'élaborer un violon, encore parfois aujourd'hui. Sans doute fondées sur le plan visuel, ces considérations se veulent aussi valides sur le plan acoustique - probablement en raison de la réussite acoustique de l'instrument - mais force est de remarquer que l'argumentation employée n'a généralement aucun fondement physique et n'est pas opératoire pour effectuer des changements ou des améliorations sonores.

La démarche en acoustique de l'instrument de musique est en bien des points analogue à celle de la conception acoustique et architecturale des lieux d'écoute (salles, églises) avec souvent les mêmes errements et les mêmes difficultés.

2. L'ARCHET

L'archet est une baguette entre les extrémités de laquelle sont tendus les crins qui frottent la corde. Construire de bons archets est un métier aussi spécialisé que celui de construire de bons violons. Les premiers (principaux ?, seuls ?) problèmes à résoudre sont statiques : comment faire une structure légère et solide à la fois ? En effet, l'archet ne doit pas fatiguer le musicien, doit lui laisser une latitude de contrôle maximale, doit résister à la tension des crins et à la force d'appui des musiciens qui peut être très forte dans certains passages. A l'inverse de la corde frottée ou de la structure mécano-acoustique de la caisse qui sont des dispositifs physiques complexes et intéressants à étudier en eux-mêmes, le dispositif élémentaire qu'est l'archet ne soulève que peu de questions. En première approche, le sujet physique est apparemment vite épuisé par les mesures de densité ou d'élasticité en différents points. De telles études, très peu nombreuses, n'ont pas amené d'information supplémentaire relative à la qualité des archets [6]. En ce sens, l'archet constitue un cas d'école qui met à jour de manière particulièrement crue un défi posé par la recherche sur la qualité de l'instrument de musique : doubler l'échelle de mesure physique par des échelles de mesures perceptives (sur le musicien, l'auditeur ou ... le luthier ; sur le plan psycho-acoustique, psycho-moteur, ou autre).

3. LA CORDE FROTTÉE

Le musicien n'utilise les doigts de la main gauche que pour régler la hauteur du son (en changeant la longueur L de la corde). Tout le reste (sonorité, durée et profil d'amplitude des notes) dépend de son jeu d'archet. Les physiciens utilisent actuellement trois paramètres pour le décrire : position de l'archet sur la corde (BL), vitesse de l'archet v_a et force de pression d'archet sur la corde (p) qui altère la caractéristique de friction.

3.1 Analyse cinématique : le mouvement de Helmholtz et ses implications musicales.
Helmholtz a montré expérimentalement que, en première approximation, le mouvement d'une corde frottée donne à chaque point une alternance de deux vitesses constantes, dans un rapport

LE VIOLON : STRUCTURE MÉCANIQUE À RÉSONANCE SENSIBLE

cyclique égal à la position relative du point sur la corde (figure 2). On peut décrire le mouvement d'ensemble comme la propagation d'un angle géométrique, équivalent à une discontinuité de vitesse, sur la corde, supposée être une ligne de transmission d'impédance caractéristique Z_c , parfaitement flexible et immobile aux extrémités. Sous l'archet, placé en position βL , la vitesse de la corde sera égale à la vitesse de l'archet v_a durant $(1-\beta)T$.

Selon cette description, la force exercée par la corde à son extrémité a un spectre fixe ; l'archet commande l'amplitude du mouvement ; la pression d'archet n'a aucune incidence.

Dans une remarquable étude expérimentale, Askenfelt [7] met en évidence - entre autres - comment deux violonistes utilisent v_a β et β de manières différentes pour faire varier la nuance d'une note tenue, isolée (figure 3). Il apparaît nettement que la description élémentaire ne suffit pas pour rendre compte des phénomènes. Cette étude analyse également les gammes de valeurs de ces trois paramètres, utilisées par des musiciens dans différentes situations de jeu. De nombreuses études expérimentales montrent que le mouvement de Helmholtz est une sérieuse idéalisation des mouvements réels. On a ainsi pu montrer, à la fois théoriquement et expérimentalement [8],[9] que la phase de glissement sous la corde avait tendance à durer moins longtemps que l'intervalle théorique βT .

3.2 La caractéristique de friction et la stabilité du mouvement de Helmholtz.

La caractéristique d'excitation reste relativement mal connue. La représentation habituelle (figure 4) ne fait pas la part d'une trouvaille récente de Smith [10] selon laquelle la caractéristique présenterait une hystérésis due à la fusion locale de la collophane sur l'archet au cours de la phase de glissement. La courbe de friction n'étant plus nulle part monovaluée et dépendant de l'état vibratoire de la corde qui modifie l'état thermique de la collophane, on ne peut donc plus véritablement parler de caractéristique.

Un grand nombre de phénomènes importants doivent cependant pouvoir être étudiés sans connaître les détails du mécanisme de friction auxquels le musicien est apparemment peu sensible : l'état de l'archet n'est certainement pas uniforme, il s'altère entre deux passages de collophane et cette dernière est un mélange artisanal loin d'être normalisé.

La nature du mécanisme de friction intervient toutefois de manière décisive dans la question de la stabilité du mouvement : durant la phase de glissement, l'archet présente à la corde une résistance dynamique négative. Les perturbations qui voyagent sur la corde et dont le passage sous l'archet coïncident avec une phase de glissement sont donc amplifiées. Selon McIntyre, Schumacher et Woodhouse [11], les seules instabilités qui peuvent se développer sur un tel système prennent nécessairement la forme de sous-harmoniques, que Schumacher et Chafe ont plus tard mis clairement en évidence [12].

Afin précisément de comprendre quelles étaient les corrélations entre les mouvements obtenus sur la corde et la caractéristique d'excitation, Weinreich et Caussé [13] ont imaginé un système électromagnétique commandé par ordinateur ("archet numérique") qui produise sur la corde une caractéristique de force en fonction de la vitesse locale, analogue à celle de la figure 4. En réalité, il s'agit d'une véritable fonction, qui présente une variation très rapide de F en fonction de v dans la partie adhérente. Ce dispositif leur a notamment permis d'explorer la question de la stabilité du mouvement de Helmholtz qui reste apparemment une question partiellement ouverte [14].

LE VIOLON : STRUCTURE MÉCANIQUE À RÉSONANCE SENSIBLE

3.3 Problèmes dynamiques sur la corde frottée

Le traitement temporel de la mécanique de la corde frottée, initié par Cremer [4] et repris par McIntyre, Schumacher et Woodhouse dans un élégant formalisme de simulation numérique [15] permet de compenser en partie le manque de formulations analytiques relatives à l'interaction entre la corde (système linéaire) et l'archet (système violemment non-linéaire). Ces simulations numériques du fonctionnement de la corde frottée complètent ainsi de manière quasi phénoménologique les raisonnements physiques des auteurs ou de leurs prédécesseurs.

Un point crucial pour l'instrumentiste réside dans l'influence de la pression d'archet sur le mouvement de la corde. Cette influence se manifeste de trois manières : sur le spectre de vibration, sur la fréquence de jeu dans certains cas et en termes de limites minimale et maximale qui permettent d'entretenir le mouvement de Helmholtz.

En se propageant le long de la corde (légèrement dispersive) et en se réfléchissant aux extrémités (dissipatives, en particulier aux fréquences aiguës), l'angle (ou la discontinuité de vitesse) subit un adoucissement compensé par chaque passage sous l'archet. Une pression d'archet plus forte est plus efficace pour régénérer la discontinuité et favorise donc les harmoniques aigus du son.

Lorsqu'elle devient trop forte, la pression d'archet influence notablement la fréquence de jeu de la corde frottée. Il se produit un abaissement de la hauteur, lié à l'apparition d'une hystérésis dans le cycle de friction [15]. La fréquence de jeu, compromis entre les fréquences de résonance de la corde, non harmoniques en général, dépend du spectre de la vibration. Ce problème, ainsi que celui de l'effet d'abaissement, a été récemment résolu sur le plan analytique par la notion de bilan des puissances réactives fournies par les différentes composantes du mouvement [16]. C'est probablement cet effet qui est responsable de la légère montée en fréquence lors du transitoire d'attaque [17] au début duquel la pression d'archet est forte et la vitesse d'archet faible. En jeu tenu, le musicien augmente en général ensemble pression et vitesse d'archet ce qui atténue considérablement l'effet d'abaissement.

La pression d'archet ne peut prendre n'importe quelles valeurs [18] : pour un coefficient de friction et une impédance caractéristique donnés, elle est limitée au maximum par le rapport Z_{cva}/β et au minimum par un autre rapport faisant intervenir β^2 et le prélèvement énergétique du chevalet à l'extrémité de la corde (figure 5). La conclusion est que la latitude de dynamique de jeu est théoriquement très réduite lorsque l'archet joue près du chevalet, et qu'il y a sans doute un compromis nécessaire entre la nécessité de prendre de l'énergie à la corde (pour transmettre du son) mais pas trop (pour que le mouvement de Helmholtz puisse être entretenu à des pressions d'archet faibles). Les mesures d'Askenfelt [7] montrent que les violonistes semblent utiliser de grandes marges de sécurité par rapport à ces limites théoriques.

Tous les problèmes dynamiques envisagés jusqu'à maintenant supposent un couplage faible entre la corde et la structure. C'est le cas sauf lorsqu'une résonance propre de la structure est très proche de la note jouée par la corde. Dans ces conditions, l'amplitude du mouvement de la structure tend à augmenter considérablement, en pompant de plus en plus d'énergie à la corde. Bientôt, la pression d'archet n'est plus suffisante pour assurer le mouvement de Helmholtz qui dégénère de sorte à diminuer l'amplitude de vibration de la caisse. Un nouveau mouvement de Helmholtz réapparaît alors, etc. Le roulement gênant produit par ce phénomène, connu sous le nom de note de loup, peut être minimisé en augmentant la pression d'archet ou en atténuant, par un dispositif annexe, l'influence de la résonance indésirable sur la corde. Ce phénomène a été étudié récemment sous l'angle de la multi-périodicité des systèmes dynamiques [19].

LE VIOLON : STRUCTURE MÉCANIQUE À RÉSONANCE SENSIBLE

4. LE CHEVALET

Le rôle évident du chevalet est de transformer l'effort exercée par la vibration des cordes à leur extrémité, parallèlement au plan de la table en effort sur la table perpendiculaire à son plan. Ainsi envisagé, le fonctionnement du chevalet est indissociable de celui de l'âme. Placée sous le pied grave du chevalet, elle crée un point pratiquement fixe à cet endroit de la table d'harmonie. De cette configuration mécanique résulte un grand contraste entre les mobilités des emplacements sur la table des deux pieds du chevalet. L'effet de pivotement du chevalet autour du point fixe permet le changement de direction de l'effort exercé par la corde.

Cette vision simpliste du fonctionnement n'est plus valable pour les fréquences supérieures à 1,5 ou 2 kHz ou aux résonances de la caisse. En particulier, certains modes propres importants comme le mode de respiration de la caisse à travers les ouïes (cf. 5.3) imposent aux deux pieds du chevalet des mouvements en phase [20].

Le chevalet de violon présente une première résonance importante vers 3 000 Hz, dans un mouvement de rotation du sommet autour de la partie centrale, rigide (figure 6). Cette résonance a pour effet de générer dans le son un véritable formant dans la zone fréquentielle la plus sensible de l'oreille, caractéristique de la sonorité de l'instrument et qui justifie partiellement l'analogie parfois faite entre le violon et la voix. Une autre résonance importante a lieu à 6 000 Hz dans un mouvement de translation perpendiculaire au plan de la table. Pour le violoncelle, les premières résonances, dans des mouvements de nature géométrique différentes, ont lieu à 1 et 2 kHz (travaux de Reinicke, repris et commentés dans Cremer [4]). Enfin, d'autres modes propres du chevalet en flexion et les mouvements de la table font que les mouvements du sommet du chevalet ont des amplitudes très comparables dans les trois directions de l'espace, caractérisables rigoureusement en termes d'admittance mécanique tridimensionnelle [21].

Récemment, plusieurs chercheurs [22] ont proposé diverses méthodes pour prévoir comment régler de manière contrôlée les résonances du chevalet par un ajustement des profils.

5. LA STRUCTURE SONORE

La structure sonore du violon est constituée d'une caisse en bois et d'une cavité aérienne. La caisse en bois est mise en vibration par l'effort transmis par le chevalet à la table d'harmonie et au fond par l'intermédiaire de l'âme et des éclisses. Ces dernières, très raides, ne semblent jouer qu'un rôle mineur dans la vibration mécanique et son couplage à l'air extérieur. L'âme [23] peut être considérée comme un ressort très raide jusqu'à sa première résonance à au moins 10 kHz. La cavité aérienne créée par le volume intérieur de la caisse, est mise en vibration par le mouvement de la table et du fond et émet vers l'extérieur par les ouïes pratiquées dans la table d'harmonie.

Les problèmes posés au luthier par la construction de cette structure sont que l'instrument ne se déforme pas au fil du temps, qu'il soit beau et que ses propriétés dynamiques soient à peu près semblables à celles des meilleurs instruments (du passé), au regard de critères dont fort peu sont connus objectivement.

5.1 Le rôle statique de la caisse

La tension des cordes sur un violon a évolué dans le temps ainsi que l'angle qu'elles forment au chevalet. Pour une tension totale d'environ 300 N, c'est 100 N qui s'exercent verticalement sur la table, approximativement en son milieu. La nécessité de résister à la déformation induite par de

LE VIOLON : STRUCTURE MÉCANIQUE À RÉSONANCE SENSIBLE

tels efforts est évidemment à la source de l'adoption de la forme en voûte pour la table. Le fond est plat pour les instruments de la famille des violes (y compris la contrebasse, dans de nombreux cas) et toujours bombé sur violon, alto et violoncelle. L'évolution du jeu a occasionné des transformations importantes des instruments, opérées le plus souvent au 19^{ème} siècle : changement du manche, renforcement de la barre. Le fait que les contours extérieurs de l'instrument n'aient pas varié depuis 3 ou 4 siècles donne l'illusion que son esthétique sonore est restée la même et accrédite le mythe de l'existence d'un idéal atteint au début du 18^{ème} siècle. Très étayées par les résultats de nombreuses recherches, les interprétations et les sonorités de la musique baroque prouvent aujourd'hui à nos oreilles que l'esthétique a en réalité considérablement évolué. Pour nos yeux, il suffit d'avoir vu ouvert un instrument ancien où manche, barre de table, âme, chevalet, cordes ont été systématiquement remplacés et où il ne reste parfois que 30 % du bois original pour tempérer la croyance en certains mythes. C'est plutôt la sélection opérée par le temps sur ces instruments d'usage souvent intensif qui étend à l'ensemble d'une époque les vertus de quelques très grands luthiers. Rien ne prouve que l'ensemble de la production actuelle soit moins bonne que celle d'alors. N'oublions pas non plus que nombre de concertistes préfèrent jouer et enregistrer sur des instruments contemporains (certains vont maintenant jusqu'à le dire), étant bien entendu qu'ils possèdent aussi un instrument ancien renommé.

Plusieurs règles de dessin extérieur ont été proposées pour assurer l'équilibre interne de la structure. Le compromis à réaliser se trouve entre d'une part la minimisation des contraintes volumiques internes afin d'éviter l'effondrement de l'instrument qui vieillit et d'autre part l'allègement de la table recherché par tous les luthiers afin d'améliorer les qualités sonores. Comme aucune formulation détaillée et quantifiée du critère d'allègement n'a été proposée jusqu'à présent et que la forme et le profil des voûtes varient d'un instrument à l'autre, on voit que de telles règles, seulement géométriques, ne peuvent résoudre qu'en partie un problème incomplètement posé.

5.2 La caractérisation des bois - Les modes propres de la table et du fond.

Malgré une sélection soignée des espèces de bois, des lieux de coupe et des arbres choisis par des forestiers spécialisés, une des difficultés auxquelles doit faire face le luthier consiste à obtenir un résultat défini d'avance en utilisant un matériau dont les propriétés ne sont pas constantes. Un des moyens les plus courants utilisés par les luthiers pour normaliser leur production consiste à écouter les vibrations libres de la table et du fond seuls. On peut donc penser que ce sont les premiers modes propres de la table et du fond, avant collage de la barre, assemblage et vernissage qui leur servent de référence.

Une longue expérience de facture d'instruments à cordes et de mesures mécaniques a amené C. Hutchins [24] à proposer des critères d'accord entre ces premiers modes propres de la table et du fond. Que ces règles servent de guides à certains luthiers est indéniable ; qu'il s'agisse de guides nécessaires ou garantis est certainement inexact ; ce ne sont bien sûr pas les seules règles de construction à suivre et un très grand nombre d'excellents violons ne les suivent pas. En tout état de cause, il reste très difficile de s'accorder les propriétés que doit rassembler un bon violon.

Les constantes élastiques d'un matériau anisotrope comme le bois peuvent être mesurées par plusieurs méthodes dont le recensement critique dépasse le cadre de cet article. Schumacher [25] a montré récemment comment seuls trois paramètres élastiques (s_{11} , s_{22} et s_{66}) étaient susceptibles d'influencer les modes propres de la table et du fond qui, rappelons-le, sont sculptés dans la masse et non pas mis en forme sous contrainte, ce qui serait *a priori* beaucoup plus simple

LE VIOLON : STRUCTURE MÉCANIQUE À RÉSONANCE SENSIBLE

à traiter par le calcul. Afin de donner aux luthiers une méthode de mesure du bois simple à mettre en œuvre, Molin, Lindgren et Jansson [26] ont proposé une méthode qui mettent en correspondance les modules d'Young dans les directions principales ainsi que le module de torsion avec les trois premiers modes propres de l'assemblage de deux quartiers de bois normalisés qui servira à fabriquer la table ou le fond.

Une littérature considérable existe concernant l'influence des paramètres mécaniques ou du profil d'épaisseur sur les modes propres en question.

Un type d'étude malheureusement assez rare en acoustique musicale consiste à essayer de mettre en relation des paramètres acoustiques ou mécaniques avec des critères perceptifs. Un tel travail a été réalisé par D. Douau [27] en collaboration avec D. Friederich, facteur de guitare, sur des échantillons des pièces de bois utilisées par ce dernier pour la fabrication des tables de nombreux instruments. Une description très complète de plusieurs bois de lutherie a été effectuée sous l'angle de l'anatomie (taille et forme des cellules et de leurs parois, de la largeur des cernes, ...), de la densité (moyenne, du bois d'hiver, du bois d'été), et des propriétés mécaniques (modules d'Young radial et longitudinal, coefficients d'amortissement). Les jugements consignés par le luthier sur les instruments correspondants ont servi de base de référence pour l'analyse factorielle des mesures. La méticulosité et l'esprit méthodique de ce facteur de renommée internationale garantissent, autant que faire se peut, la fiabilité des corrélations établies.

Une partie des résultats a pu être transposée aux bois utilisés en lutherie de violon où les principales caractéristiques recherchées par le luthier semblent être la densité et le rapport des modules d'Young. On peut synthétiser des telles propriétés à l'aide de matériaux composites, sandwich de mousse et de fibres de carbone. Deux prototypes, apparemment réussis mais sans lendemain, avaient été réalisés aux Etats-Unis à la suite d'études physiques des bois [28] ; en France, les recherches évoquées ci-dessus ont donné lieu à la construction de plusieurs prototypes de violons, altos, violoncelles et contrebasses très honorables, encouragés par de grands musiciens. Ces essais approfondis ont ouvert la voie à une industrialisation d'instruments aux qualités mécaniques maniables presque à volonté.

Si la caractérisation élastique et densimétrique des bois est bien mesurable et partiellement comprise dans ses implications en lutherie, il n'en est pas de même en ce qui concerne les amortissements internes. Aucune étude n'apporte de conclusion bien affirmée sur ce sujet et il faut noter que les amortissements observables sur des plaques (table ou fond) isolées d'excellents instruments anciens varient dans des proportions considérables. Enfin, si l'influence du vernis sur les propriétés élastiques de la structure peut être prise en compte au moment de la conception et du réglage de la table et du fond (l'étude de Schelleng reste un référence à ce jour [29]), il n'en va pas aussi facilement pour ce qui est des amortissements internes. Ce champ reste largement ouvert.

5.3 Fonctionnement dynamique de la caisse et de la cavité interne.

De nombreuses études expérimentales ont été menées sur le comportement vibratoire de l'instrument. Le comportement linéaire de la caisse, dans la gamme dynamique normale du violon, peut être considéré comme assuré par la cohérence des résultats obtenus sous cette hypothèse par les différents types d'études :

les analyses modales donnent en principe l'ensemble des informations caractérisant la structure. L'étude mécanique de Marshall [30], la plus complète, décrit les 35 modes (entre 120 et

Proceedings of the Institute of Acoustics

LE VIOLON : STRUCTURE MÉCANIQUE À RÉSONANCE SENSIBLE

1275 Hz) d'un seul instrument et apporte nombre de renseignements ponctuels intéressants. Plusieurs analyses des modes acoustiques de la cavité ont aussi été réalisées [31], [32].

- les visualisations des modes propres du violon entier, de la table et du fond séparément (nombreuses méthodes utilisées depuis Chladni jusqu'à l'interférométrie laser).
- les mesures ponctuelles de fonctions de transfert (transfert entre points [33] ou composantes du champ acoustique [34] et la vibration des cordes ou du chevalet ; admittance mécanique au chevalet [21]).

Toutes ces déterminations donnent une signature caractéristique de l'instrument mesuré mais aucune interprétation ne permet actuellement d'obtenir une corrélation entre cette signature et des qualités musicales. Si de nombreux détails de fonctionnement ont pu être mis en évidence, le nombre très restreint d'instruments mesurés par étude et l'hétérogénéité des méthodes rendent les généralisations parfois hasardeuses. Les trouvailles que l'on retrouve d'étude en étude concernent principalement le domaine vibratoire inférieur à 600 - 700 Hz pour le violon. Les conclusions qui peuvent en être tirées ne peuvent donc porter sur l'appréciation fine des sonorités qui fait intervenir un domaine spectral beaucoup plus vaste.

Plusieurs de ces études ont permis d'identifier certaines caractéristiques mécaniques du violon - forte dissymétrie vibratoire en basse fréquence entre les deux pieds du chevalet, par exemple -. Il est raisonnable de penser qu'il s'agit de solutions apportées empiriquement par la facture instrumentale à des problèmes physiques et perceptifs - rayonner le grave avec un instrument de taille réduite, pour cet exemple -. En revanche, l'état des recherches ne permet pas à l'heure actuelle de déterminer à quel point les caractéristiques identifiées doivent être développées ni quels sont les conflits possibles et les compromis nécessaires entre telles ou telles exigences supposées.

Parmi les très nombreux modes de cet ensemble mécano-acoustique, il convient de distinguer, par sélection successive :

- ceux qui ne sont pratiquement pas excités par le chevalet ; la seule source de force étant le mouvement des cordes, ces modes n'offrent pas d'intérêt *a priori*
- ceux qui ne sont pas couplés au champ acoustique ou seulement au champ proche ; mis en évidence notamment par Marshall [30] ou Moral et Jansson [35] mais peu étudiés, ces modes pourraient cependant être importants pour le contrôle tactile (vibration de la touche) et sonore (champ proche) par le musicien de son propre jeu.
- ceux enfin qui sont couplés à la fois au chevalet et au champ acoustique. lointain ; en basse fréquence, ces modes résultent de la combinaison de "mouvements élémentaires" mécaniques et aériens couplés dont la représentation est plus intuitive et donc plus utilisable.

Sans rentrer dans l'examen complet et détaillé de la ménagerie modale, on peut indiquer plusieurs résultats caractéristiques :

Le mouvement de respiration de la caisse est très étroitement couplé au mouvement global de l'air dans la cavité à travers les ouïes (comme sur un résonateur de Helmholtz) pour générer un important mode de résonance autour de 280 Hz, qui compense efficacement l'inaptitude qu'aurait une table de cette dimension à rayonner efficacement. Le rayonnement monopolaire associé laisse la place à un dipolaire au-dessous d'une fréquence de 200 Hz (fondamental de la note la

LE VIOLON : STRUCTURE MÉCANIQUE À RÉSONANCE SENSIBLE

plus grave de l'instrument) [34]. Cette résonance est très importante sur le plan perceptif. Hutchins a réalisé un violon [36] où il est possible de supprimer partiellement ou complètement cette résonance par ouverture de trous dans les éclisses (violon Le Gruyère). Le résultat est très démonstratif et la sensation de rendu du grave disparaît totalement lorsque la résonance des ouïes est éliminée. Dans une étude comparative menée sur un grand nombre de violons, Dünwald [37] remarque que la résonance des ouïes est généralement forte sur les très bons violons et propose comme critère de qualité le niveau de cette résonance.

Le premier mode de résonance de plaque est étroitement couplé au deuxième mode aérien de la cavité pour générer une résonance importante vers 480 Hz. Une discussion détaillée des phénomènes à ces fréquences [33] montre que certaines résonances de la structure sont excitées par un mouvement des cordes polarisé dans le plan formé par l'archet et les cordes tandis que d'autres résonances sont couplées à une polarisation perpendiculaire.

De nombreuses études montrent que l'admittance (ou mobilité) mécanique des deux pieds du chevalet est très différente en-dessous de 800 Hz pour le violon (200 Hz pour le violoncelle). A travers la comparaison entre deux spécimens de violoncelle, Eggers [38] met en évidence une résonance mécanique vers 250 Hz. Il estime qu'en-dessous de cette fréquence, une différence d'impédance insuffisante entre les deux pieds du chevalet est responsable du mauvais rendu sonore d'un instrument d'usine pour les fondamentaux des notes des registres grave et médium.

D'après Moral et Jansson [35], la tenue du violon par le musicien a un effet essentiellement sur quelques modes vibratoires inférieurs à 700 Hz.

Au-dessus de 800 Hz environ, l'augmentation de la densité modale et des amortissements propres rendent les modes difficilement distinguables les uns des autres et utilisables en tant que tels. Il convient de noter toutefois que les pics d'une fonction de transfert globale entre corde et champ acoustique restent suffisamment étroits pour que le vibrato de fréquence s'accompagne d'un vibrato de couleur sonore : l'excursion en fréquence de la note vibrée est telle que les harmoniques explorent différemment les uns des autres des parties renforcées ou affaiblies de la réponse spectrale. L'étude de Dünwald déjà citée [37] montre également que statistiquement, les meilleurs violons présentent une résonance large vers 2 500 Hz. Il propose comme critère quantitatif correspondant le pourcentage de notes pour lesquelles le partiel le plus intense se situe entre 1 300 et 2 500 Hz, dans un mode d'excitation calibré par ses soins.

Aux études réalisées dans le passé sur la directionalité globale de l'instrument n'ont pas succédé des études plus détaillées mettant en œuvre les techniques récentes d'intensimétrie acoustique. La raison tient sans doute à la quantité de données à manipuler et au manque de lignes directrices pour les interpréter en termes de ce qui serait souhaité sur le plan musical.

6. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Hutchins C. M., *A history of violin research*, J. Acoust. Soc. Am., 73 (5), 1421-1440 (1983).
- [2] McIntyre M. E. et Woodhouse J., *The acoustics of stringed musical instruments*, Interdisciplinary Science Reviews 3 (2), 157-173 (1978), réédité par Th. D. Rossing in *Musical Acoustics, Selected Reprints*, American Association of Physics Teachers (1988).
- [3] *Musical Acoustics*, Parts 1 and 2, édités par C. M. Hutchins in *Benchmark Papers in Acoustics* (1975-76), Dowden Hutchinson et Ross, distribué par Wiley, New York.
- [4] Cremer L., *The Physics of the violin*, MIT Press, Cambridge, Massachussets (1984), traduction de *Physik der Geige*, Hirzel Verlag, Stuttgart (1981).

- [5] Publication semi-annuelle, 112 Essex Avenue, Montclair, N.J. 07042.
- [6] Voir par exemple deux articles publiés par J. A. Abbott, W. M. Abbott et E. Doyle dans le J. Catgut Acoust. Soc. 1 (5) Series II (1990) sur l'expérience d'un archetier, J. Bolander.
- [7] Askenfelt A., *Measurement of the bowing parameters in violin playing*, J. Acoust. Soc. Am. 80 (4), 1007-1015 (1985) et du même auteur, *Measurement of the bowing parameters in violin playing II : Bow-bridge distance, dynamic range and limits of bow force*, J. Acoust. Soc. Am. 86 (2), 503-516 (1989).
- [8] Weinreich G. et Caussé R., *Elementary stability considerations for bowed-string motion*, J. Acoust. Soc. Am. 89 (2), 887-895 (1991).
- [9] Lawergren B., *On the motion of bowed violin strings*, Acustica 44, 194-206 (1980).
- [10] Smith J. H., *Stick-slip vibration and its constitutive laws*, thèse de doctorat, Université de Cambridge (1990).
- [11] McIntyre M. E., Schumacher R. T. et Woodhouse J., *Aperiodicity in bowed-string motion*, Acustica 49, 13-32 (1981).
- [12] Schumacher R. T. et Chafe C. D., colloque *Modèles physiques, création musicale et ordinateurs*, Grenoble (1990).
- [13] Caussé R. et Weinreich G., *Simulation and further experiment with the digital bow*, 13th International Congress on Acoustics, Belgrade (1989).
- [14] Weinreich G. et Caussé R., *Elementary stability considerations for bowed-string motion*, J. Acoust. Soc. Am. 89 (2), p. 887-895 (1991).
- [15] voir par exemple McIntyre M. E., Schumacher R. T. et Woodhouse J., *On the oscillations of musical instruments*, J. Acoust. Soc. Am. 74 (5), 1325-1345 (1983), qui reprend et généralise des résultats exposés précédemment ou plus récemment Woodhouse J., *Physical modelling of bowed strings*, colloque *Modèles physiques, création musicale et ordinateurs*, Grenoble (1990).
- [16] Boutillon X., *Analytical investigation of the flattening effect : The reactive power balance rule*, J. Acoust. Soc. Am. 90 (2), 754-763 (1991).
- [17] Castellengo M., communication personnelle.
- [18] Schelleng J. C., *The bowed string and the player*, J. Acoust. Soc. Am. 53 (1), 26-41 (1973).
- [19] Gibiat V., *From order to disorder ; an approach of chaos in musical acoustics*, EUSIPCO 92, Bruxelles (1992).
- [20] Trott W. J., *The violin and its bridge*, J. Acoust. Soc. Am. 81 (6), p. 1948-1954 (1987).
- [21] Boutillon X. et Weinreich G., *Measurement of the three-dimensional admittance at a violin bridge*, 13th International Congress on Acoustics, Belgrade (1989).
- [22] Rodgers O. E. et Masino T. R., *The effect of wood removal on bridge frequencies* et Jansson, E. V., Fryden L. et Mattsson G., *On tuning of the violin bridge*, J. Catgut Acoust. Soc., 1 (6) (Series II), p. 6-10 et 11-15 (1990).
- [23] Fang N. J. J. et Rodgers O., *Violin soundpost vibration*, J. Catgut Acoust. Soc., 2 (1) (Series II), p. 39-40 (1992).
- [24] Hutchins C. M., *The acoustics of violin plates*, Sci. Am. 245 (4), 126-135 (1981).
- [25] Schumacher R. T., *Compliances of wood for violin top plates*, J. Acoust. Soc. Am. 84 (4), 1223-1235 (1988).
- [26] Molin N. E., Lindgren L.-E. et Jansson E. V., *Parameter of violin plates and their influence on the plate mode*, J. Acoust. Soc. Am. 83 (1), 281-291 (1988).
- [27] Douau D., *Evaluation des propriétés acoustiques, mécanique et structurales des bois de tables d'harmonie de guitare ; leur influence sur le timbre de l'instrument*, thèse de doctorat, Université du Maine.
- [28] Haines et al., Catgut Acoust. Soc. 23, 24, 31, 33.

LE VIOLON : STRUCTURE MÉCANIQUE À RÉSONANCE SENSIBLE

- [29] Schelleng J. C., *Acoustical effects of violin varnish*, J. Acoust. Soc. Am. **44** (5), 1175-1183 (1968).
- [30] Marshall K. D., *Modal Analysis of a violin*, J. Acoust. Soc. Am., **77** (2), 695-709 (1985).
- [31] Jansson E. V., *Acoustical properties of complex cavities. Prediction and measurement of resonance properties of violin-shaped and guitar-shaped cavities*, Acustica **37**, 211-221 (1977).
- [32] Shaw E.A.G., *Cavity resonance in the violin : network representation and the effect of damped and undamped rib holes*, J. Acoust. Soc. Am. **87** (1), 398-410 (1990).
- [33] Arnold E. B., Weinreich G., *Acoustical spectroscopy of violins*, J. Acoust. Soc. Am. **72** (6), 1739-1746 (1982).
- [34] Weinreich G., *Sound hole sum rule and the dipole moment of the violin*, J. Acoust. Soc. Am. **77** (2), 710-718 (1985).
- [35] Moral et Jansson, *Eigenmodes, input admittance and the function of the violin*, Acustica **50**, 329-337 (1982).
- [36] Hutchins C. M., *A study of the cavity resonances of a violin and their effects on its tone and playing qualities*, J. Acoust. Soc. Am. **87** (1), 392-397 (1990).
- [37] Dönnwald H., *Ein Verfahren zur objektiven Bestimmung der Klangqualität von Violinen*, Acustica **58**, 162-169 (1985).
- [38] Eggers F., *Mechanical Impedance measurements around the cello*, Acustica **74**, 264-270 (1991).

7. FIGURES

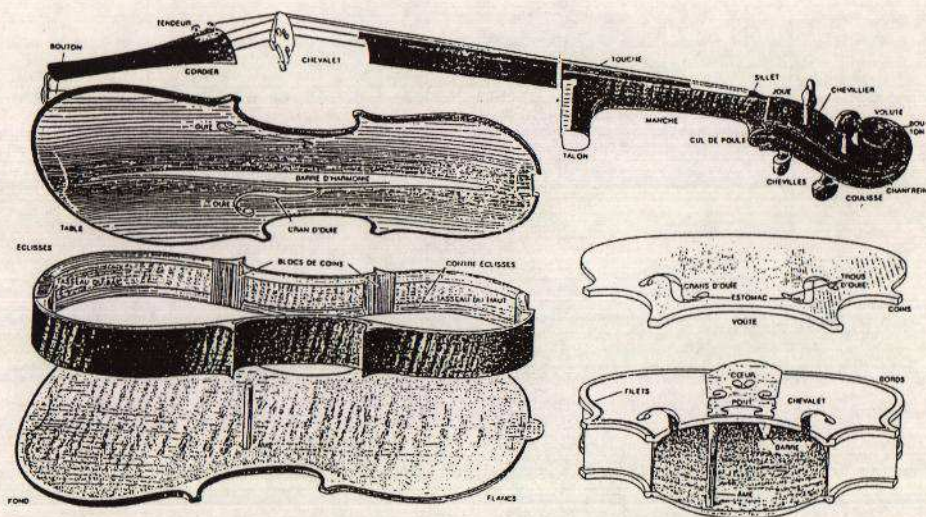


Figure 1 : Structure du violon (d'après Hutchins)

LE VIOLON : STRUCTURE MÉCANIQUE À RÉSONANCE SENSIBLE

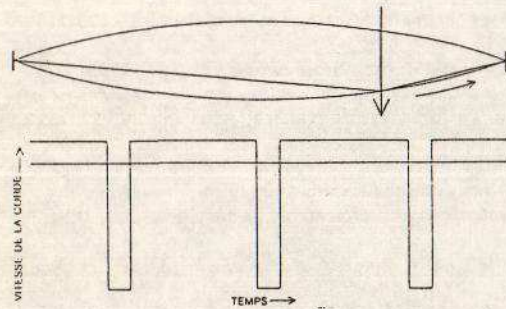


Figure 2 : Le mouvement de Helmholtz : Déplacement du coin sur la corde et vitesse de la corde sous l'archet

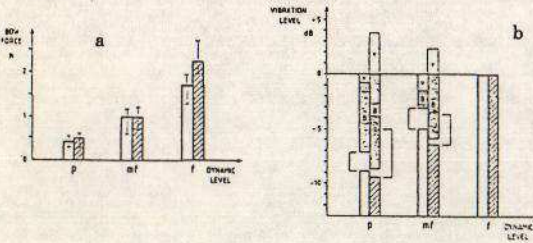


Figure 3 : a- Pression d'archet pour trois nuances différentes d'une note tenue. b- Niveau vibratoire pour les trois mêmes nuances de jeu. Incidence théorique des variations de la vitesse (en blanc) et de la position d'archet (en grisé) sur la nuance de jeu. L'écart entre le résultat de la théorie élémentaire et l'observation est marqué par les crochets terminés par une flèche. (extrait de Askenfelt [7]).

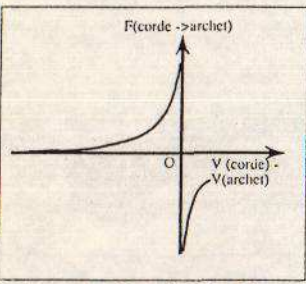


Figure 4 : Allure habituellement retenue pour la caractéristique de friction.

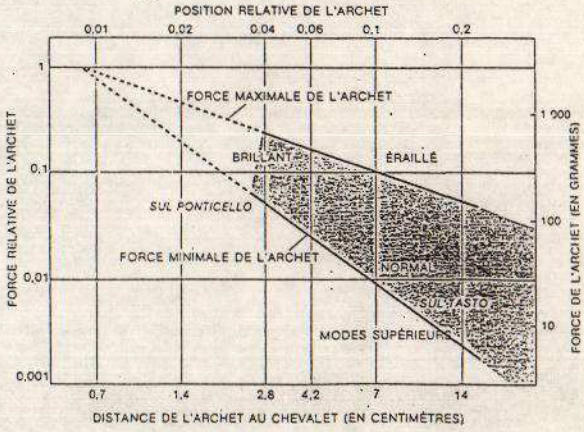


Figure 5 : Limites de la force de pression d'archet, en fonction de β (extrait de Schelleng [18]).

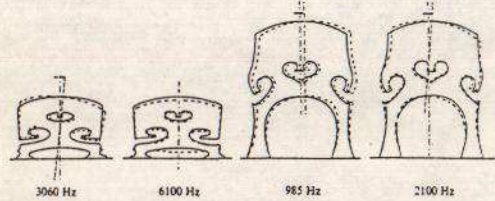


Figure 6 : Résonances d'un chevalet de violon et d'un chevalet de violoncelle (d'après Reinicke, cité par Cremer [4]).