



Le violon, la section et l'univers sons harm

CAROLINE HARTMANN

La famille des violons – violon, alto, violoncelle – fut révolutionnaire et contrairement à presque toutes les autres inventions humaines, cette forme n'a pas varié depuis cinq cent cinquante ans. Le luthier Max Möckel s'était donné comme objectif de trouver l'origine véritable de la beauté sonore et architectonique du violon. Il voulait savoir si, au regard des connaissances de la Renaissance, il était possible de découvrir quels rôles avaient joués Léonard de Vinci, Luca Pacioli et Albert Dürer pour révolutionner la construction d'instruments. Avec cette hypothèse comme point de départ, Möckel développa une norme pour la construction du violon, de l'alto et du violoncelle, dont le standard était ce que Luca Pacioli appelait la « divine proportion ».

Jadis, un luthier qualifia le son des anciens violons italiens (et tyroliens) de « *beauté sonore qui ne connaît pas de limites* ». En réalité, ces violons incarnent un concept de construction qui a culminé avec les Stradivarius, chef-d'œuvres d'Antonio Stradivari (1644-1737). Leur son peut emplir une salle de concert sans aucun effort et peut surpasser celui de tout un orchestre symphonique. La richesse des sons s'étend depuis le *fortissimo maestoso* jusqu'à la lamentation triste d'un *andante molto grave*, en passant par l'explosion de joie d'un *scherzo prestissimo*. Le seul autre instrument comparable au violon est la voix humaine. Néanmoins, tous ces sons proviennent d'une petite boîte en bois d'environ 35 à 37 cm de long pour le violon, 42 cm pour l'alto et 74 à 78 cm pour le violoncelle.

Quand on regarde plus attentivement ces chefs-d'œuvre réalisés à la main, on doit admettre que ce type d'instruments est à la fois un triomphe de l'acoustique et de la physique. Beaucoup de mythes circulent à propos de ces instruments « fabuleux ». Les luthiers d'antan étaient-ils initiés à quelque secret de la physique acoustique que nous ne connaissons plus ? Existe-t-il un type de bois ou une technique d'application du vernis secrets qui feraient toute la différence pour le son ? Ou bien existe-t-il un autre secret relatif à la découpe du bois, secret bien gardé puis perdu après la mort de Stradivarius ?

Beaucoup de questions en ce qui concerne la fabrication de cette famille d'instruments – violon, alto et violoncelle ont les mêmes principes sous-jacents de conception – restent aujourd'hui sans réponse, en particulier depuis la mort de Stradivarius, quand l'art de fabriquer de telles merveilles sombra de plus en plus dans l'oubli et qu'apparurent les spéculations les plus extravagantes et les disputes les plus âpres. La plupart de ces débats, toutefois, évitent souvent la question clef. La Renaissance – période où furent créés ces instruments – fut une période de nombreuses découvertes non seulement en matière de musique et de fabrication d'instruments mais aussi de peinture, d'arts plastiques, d'architecture et de construction de machines. L'artiste et scientifique le plus représentatif de cette époque fut sans aucun doute Léonard de Vinci.

Le monde de la musique et des instruments de musique tel qu'il existait à l'époque de la Renaissance nous donne de nombreuses raisons de croire que le violon fut *inventé*. L'idée de construire un tel instrument a dû naître des nouvelles découvertes de la Renaissance, et surtout des recherches de Léonard sur les tonalités et les sons.

Toutefois, les pythagoriciens connaissaient déjà le paradoxe suivant : l'homme ne reconnaît que quelques intervalles comme étant harmoniques, et ceux-ci sont formés sur un instrument à cordes sur lequel

d'or s des moniques

on place les doigts avec un espace différent entre eux pour chaque ton différent. Nous reviendrons à cette idée plus loin.

Le paradoxe non résolu de Pythagore

Tous les instruments de musique reposent sur un savoir acquis par l'homme depuis des milliers d'années : quand on tend des cordes au-dessus d'un espace creux, on produit des tonalités ou des sons plus ou moins beaux. Un instrument de ce genre fut construit en Inde vers 3000 avant J.-C. Deux mille cinq cents ans plus tard, Pythagore découvrit qu'il était possible d'exprimer le rapport entre deux notes – l'intervalle – à l'aide de nombres rationnels.

Pythagore inventa un instrument à une seule corde, utilisé pour des démonstrations et comme instrument de musique. Aujourd'hui, le monocorde ne sert qu'à montrer les intervalles. Par exemple, si l'on appuie la corde à un tiers de sa longueur puis qu'on la pince, la note obtenue sera d'une quinte au-dessus de celle de la même corde vibrant sans contrainte. Grâce à cette invention, l'homme a pu se rendre compte, ou expérimenter, que seulement quelques intervalles spécifiques sont beaux. Ces intervalles, appelés *synphon* par les pythagoriciens, sont

les suivants :

- l'octave (rapport 1/2) ;
- la quinte (rapport 2/3) ;
- la quarte (rapport 3/4) ;
- la tierce (rapport 4/5).

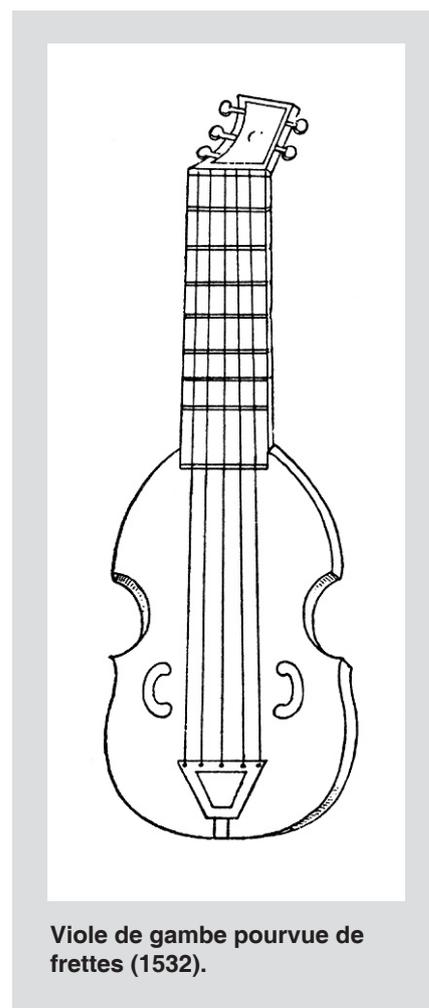
De plus, il existe le rapport 5/6 qui correspond à la tierce mineure.

Les pythagoriciens utilisaient une lyre et une cithare à huit cordes. Jusqu'au début du XVI^e siècle, c'est-à-dire au moment où fut inventée la famille des violons, tous les instruments à cordes possédaient des caractéristiques qui limitaient de façon significative la qualité de leur son et ne laissaient pas beaucoup de place à l'expression de la variété des couleurs de la gamme (cf. **Encadré 1**). Ces caractéristiques étaient les suivantes.

1. Les touches de ces instruments possédaient des divisions appelées frettes, que l'on trouve encore aujourd'hui sur les guitares. La hauteur du son était déterminée au préalable par ces frettes, ce qui obligeait à faire souvent des compromis pour jouer des sons « purs » dans toutes les clefs. Selon le type d'instrument joué, on choisissait un certain tempérament permettant de jouer dans le plus grand nombre possible de clés. Or la distance d'une frette à la suivante est toujours différente et, de ce fait, il y avait naturellement beaucoup de tempéraments différents. Quand les limites du tempérament de chaque instrument étaient atteintes, on devait à nouveau l'accorder. Quand le musicien passe d'une clé à une autre, la différence entre les notes réalisées sur les frettes et les véritables hauteurs des sons est parfois décrite comme étant le problème du *comma pythagoricien*.

2. Quant au son, les caisses de résonance de ces instruments étaient pour la plupart presque plates ou, comme pour le cas des violons, des luths et un bon nombre de violes, avaient une courbure obéissant à certaines formes géométriques (cylindre) ou inspirées de la nature. Ceci, dès le départ, imposait une limite à la capacité de pourvoir la voix de *bel canto* d'un « véritable » accompagnement et de qualité égale. De plus, le chevalet de l'instrument n'était pas incurvé et, en conséquence, l'archet ne pouvait toucher toutes les cordes en même temps. Ainsi, on ne pouvait jouer que des accords.

La nouvelle famille des violons



– violon, alto, violoncelle – fut révolutionnaire par rapport à ces deux aspects. Les voûtes caractéristiques de ces instruments sont restées inchangées jusqu'à ce jour. Les instruments respectent les mêmes portions jusque dans le moindre détail. Contrairement à presque toutes les autres inventions humaines, cette forme n'a pas varié depuis cinq cent cinquante ans.

De surcroît, le paradoxe des couleurs de la gamme tonale est résolu avec génie : on a simplement éliminé les frettes de telle sorte que l'interprète puisse lui-même déterminer la hauteur de la note et la manière dont il va la jouer. En dehors de la voix humaine, aucun instrument ne permet cela. Quelle percée révolutionnaire ! L'interprète peut finalement « chanter » grâce à son instrument, comme on peut s'en rendre compte en écoutant les grands virtuoses du violon. Ces deux points prouvent également que la famille des violons n'a pu en aucun cas se développer à partir d'autres instruments.

Le luthier Max Möckel, qui tra-

Encadré 1 - « Une musique totalement pure est absolument impossible »

Le savant Ernst-Florens Chladni, professeur du célèbre physicien Wilhelm Weber, explique pourquoi la musique « pure » est impossible : « *Quel que soit le tempérament que vous choisissez, un petit écart de la pureté générale de la relation tonale est indispensable – non seulement pour les instruments à diapason fixe, comme beaucoup le croient, mais aussi en général. La raison de ceci repose sur la nature des proportions arithmétiques elles-mêmes, de manière à ce que si l'on veut affirmer la pureté de chaque note par rapport à la fondamentale, celles-ci n'auront pas de proportion pure entre elles. De plus, si l'on veut donner à chaque note une proportion pure par rapport à la précédente et à la suivante, alors la relation à la fondamentale est perdue. Une musique totalement pure (c'est-à-dire dans laquelle chaque quinte vaut 2/3, chaque tierce majeure vaut 4/5, chaque tierce mineure vaut 5/6, etc.) est par conséquent absolument impossible, même si l'on devait rester dans une gamme diatonique, mais aussi si l'on souhaite distinguer précisément tous les intervalles diminués et augmentés.* » [Kurze Übersicht der Schall und Klanglehre (Bref aperçu de la science du son et de la tonalité), p. 12.]

Dans ce contexte, prenons l'exemple suivant. Si l'on présente les degrés de la gamme, *sol, la, si, do, ré, mi, fa#, sol'* et *la'* (*la'* est ajouté ici à des fins de démonstration) en tant que fréquences composées des plus petits nombres entiers, 24, 27, 30, 32, 36, 40, 45, 48 et 54 Hz, on se heurte tout de suite à la difficulté suivante : les fréquences sont choisies de telle manière que *sol-si-ré* aussi bien que *do-mi-sol'* et *ré-fa#-la'* forment un accord parfait majeur. Cela veut dire que le premier intervalle de ces accords (*sol-si, do-mi* et *ré-fa#*) est celui d'une tierce majeure (4/5) et que les intervalles *si-ré, mi-sol'* et *fa#-la'* sont ceux d'une tierce mineure (5/6). Chacun de ces accords parfaits a pour rapport 2/3, donc une quinte. Toutefois, il n'est pas possible de former une quinte sur la note *ré* à l'intérieur de la même gamme.

Si avec ce *ré* comme point de départ, on utilise les mêmes notes pour former la gamme de *ré* mineur ou de *ré* majeur, on obtiendra quelque chose de presque impur pour l'oreille. Le rapport *la/do* = 27/32 n'est pas une tierce majeure ou mineure (c'est-à-dire ni 4/5, ni 5/6). De même, le rapport *la/mi* = 27/40 n'est pas une quinte pure, mais est légèrement supérieur. Le rapport d'une quinte pure à *ré* devrait être 27/40,5. Cependant, ce serait trop bas pour la gamme de *ré* (mineur ou majeur).

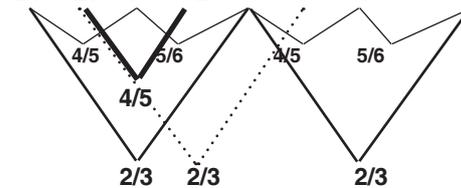
La pratique musicale montre que l'oreille (ou l'esprit) connaît très bien la façon d'aborder ce paradoxe, et comment l'utiliser de manière *créative*. Elle fait continuellement disparaître, *autant que possible*, les petites « impuretés » ou « ambiguïtés » qui surgissent du phénomène des différences de ton expliqué ci-dessus. C'est difficile à réaliser avec des instruments à diapason fixe, mais c'est très facile sur le violon, l'alto et le violoncelle. Le « placement » ou le « tempérament », signifie qu'à des fins d'harmonie musicale générale, l'oreille abandonne la « régularité » arithmétique absolue des notes. C'est Léonard de Vinci qui en découvrit la raison décisive : l'oreille appréhende la musique non en tant que notes mais plutôt en tant qu'intervalles. Léonard écrit : « *Chaque empreinte supporte momentanément l'objet qu'elle reçoit, mais l'empreinte la plus forte sera contenue plus longuement, et la plus*

faible de façon plus courte. J'appelle réceptif, dans ce cas, chaque objet qui a varié par rapport à sa situation initiale quelle que soit l'empreinte qu'il ait reçue, et non réceptif l'objet qui peut avoir varié mais qui n'a pas pu conserver l'empreinte qui l'a fait varier. Être réceptif, c'est la condition par laquelle un coup est donné à un objet sonore, comme quand on frappe des cloches devant l'oreille. Si cette empreinte n'avait pas été contenue plus longtemps, un chant à une seule voix n'aurait pas un son harmonieux, car quand on va rapidement de la première note à la cinquième, c'est comme si l'on entendait deux notes en même temps, et par conséquent, on entendait l'harmonie de la première avec la cinquième. Mais si l'empreinte de la première ne restait pas quelques instants dans l'oreille, alors la cinquième, en suivant immédiatement la première, sonnerait seule. Et puisqu'une seule note ne constitue pas une harmonie, ce chant à une seule voix ne serait pas beau. » [Léonard de Vinci, Carnets.]

La tâche principale pour construire des instruments est, encore aujourd'hui, d'établir le tempérament le plus « précis » possible – celui qui correspond le plus à l'oreille. Le « processus actif » de l'oreille doit devenir reconstitutif afin de créer la plus belle musique possible. Avant l'invention du violon, de l'alto et du violoncelle, on ne pouvait pas le faire si facilement parce que les notes des instruments à cordes pincées ou frottées étaient prédéterminées par les frettes. Ainsi, à chaque fois que des musiciens jouant de la musique bien tempérée voulaient changer de ton, ils devaient réaccorder leurs instruments.

sol la si do ré mi fa# sol' la' si'

24 27 30 32 36 40 45 48 54 60



sol/ré = 24/36 = 2/3 (quinte pure)

ré/la' = 36/54 = 2/3 (quinte pure)

mais

la/do = 27/32 ≠ 5/6 (pas une tierce mineure)

la/mi = 27/40 ≠ 2/3 (plus grand qu'une quinte pure)

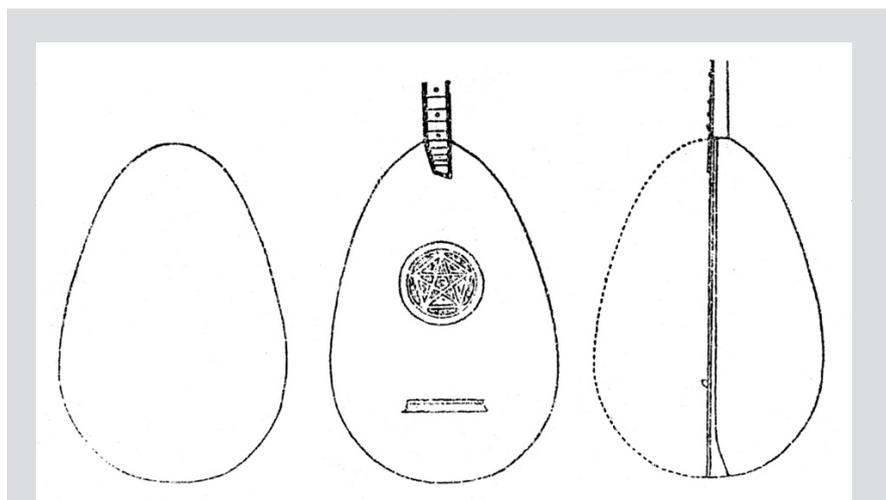
Le paradoxe du tempérament. La gamme de *sol*, qui attribue aux fréquences les plus petits nombres entiers possibles, ce qui permet la formation d'intervalles harmoniques (quinte, quarte, tierces mineure et majeure) en relation avec la fréquence fondamentale.

vailla à la charnière du XIX^e et du XX^e siècle à Saint-Pétersbourg et à Berlin, s'était donné comme objectif de trouver l'origine véritable de la beauté sonore et architectonique du violon. Il voulait savoir si, au regard des connaissances de la Renaissance, il était possible de découvrir quels rôles avaient joués Léonard de Vinci (1452-1519), Luca Pacioli (1445-1510) et Albert Dürer (1471-1528) pour révolutionner la construction d'instruments. Par conséquent, il commença à chercher les indices qui permettaient de soutenir son hypothèse dans les travaux de ces grands artistes, et il en vint à la conclusion suivante : « *Existe-t-il vraiment un secret italien ? Oui et non. Si nous pensons à une sorte de recette, cachée quelque part dans un vieux coffre, alors non. [...] Nous devons nous projeter dans l'époque à laquelle le violon fut inventé et dans les idées à partir desquelles les vieux maîtres créèrent leurs œuvres. [...] Quelque temps auparavant, les esprits les plus importants, Léonard de Vinci et son ami Luca Pacioli pour ne nommer que deux d'entre eux, s'étaient intéressés, dans leurs réalisations aux multiples facettes, aux problèmes mathématiques. Quand ils voyaient le triangle et le pentagone, ils ne les voyaient pas comme de simples figures géométriques. Ils voyaient dans le pentagone, par exemple, l'œil secret de Dieu, une image vivante et sensible, avec son nombre infini de dévoilements pour tout ce qui sera à venir.* »

Avec cette hypothèse comme point de départ, Möckel développa une norme pour la construction du violon, de l'alto et du violoncelle, dont le standard était ce que Luca Pacioli appelait la « divine proportion ». Dans la divine proportion, la division d'une droite ou d'une figure géométrique est telle que le rapport de la dimension la plus petite à la plus grande est identique à celui de la plus grande au tout. A partir de là, Möckel construisit selon cette méthode de nombreux instruments d'excellente facture.

La légitimité de la nature

Comme partout dans la nature, la beauté provient d'une légitimité intrinsèque. Le célèbre artiste italien



Le luth a la forme d'un œuf parfait, vu de face et de côté. C'est cette forme courbe qui permet ses possibilités tonales, beaucoup plus que pour les autres instruments.



A gauche, Ange jouant du violon, par Fra Angelico. Le chevalet n'étant pas incurvé, l'archet ne peut pas éviter de toucher toutes les cordes en même temps, ce qui veut dire que l'on ne peut jouer que des accords. De plus, les touches sont divisées en frettes et l'instrument est plat. A droite, on peut remarquer que la forme extérieure de cette *lira da braccio* est semblable au corps humain. Toutefois, la table d'harmonie est presque plate.

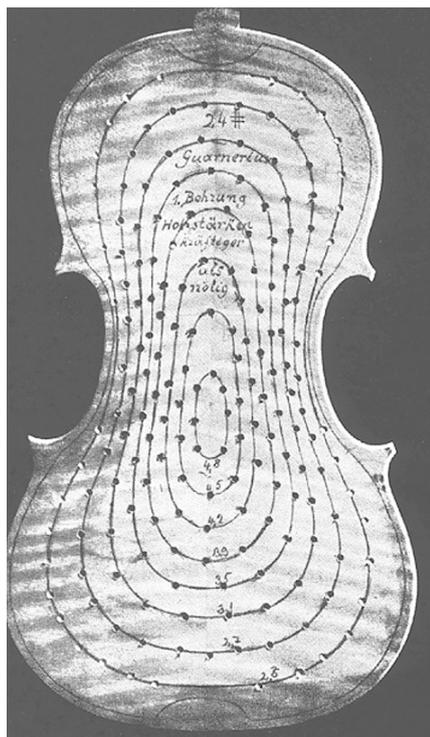
Leon Battista Alberti (1404-1472), intensivement étudié par Dürer, affirmait : « *La Beauté est un accord légitime spécifique parmi toutes les parties, qui consiste dans le fait que l'on ne peut ni ajouter, ni soustraire, ni changer quoi que ce soit, sans que le résultat soit moins satisfaisant.* »

Léonard et son ami Pacioli savaient aussi que dans les processus

de croissance homothétiques, on trouve souvent la proportion que Pacioli appelait « divine » et connue sous le terme « section d'or ». Pour eux, ce n'était pas seulement un principe harmonieux de constructions mathématiques mais le principe du vivant. Cependant, quel est le pouvoir qui crée uniquement cette proportion dès qu'il y a crois-

sance ?

Dans cet esprit, Nicolas de Cues (1401-1464), le scientifique et philosophe qui fut en relation avec tous les grands érudits de son temps, apporta une idée révolutionnaire décisive dans le débat scientifique. Selon lui, il est possible d'exprimer toutes les lignes courbes, comme les cercles, les arcs, etc., sous la forme de lignes droites et, en faisant de la sorte, il créa la base permettant de construire et de représenter des courbes aussi bien mathématiquement que géométriquement. Le Cusain savait ce que cela signifiait pour les développements ultérieurs de la musique, comme il l'écrivit : « [...] de même que chaque ligne droite peut être le côté d'un triangle, d'un carré, d'un pentagone, etc., on peut trouver une quantité innombrable de lignes courbes qui ressemblent à une droite donnée ; en conséquence, on peut aussi trouver des angles qui



Le perçage des courbes d'épaisseur.

agissent comme une droite donnée, c'est-à-dire comme le côté et la diagonale d'un carré, ou le rayon d'un cercle, et de même dans toutes les surfaces qui se comportent comme des lignes droites données.

« De là, il est possible d'arriver à de nouvelles conclusions qui, jusqu'à présent, étaient dissimulées non seulement pour la géométrie, mais également inconnues pour la musique et ses instruments, si bien que, pour celui qui ferait de son mieux pour comprendre cela, il sera révélé dans toute sa clarté ce qui était absolument susceptible d'être connu en géométrie mais n'était pas véritablement connu. » [Nicolas de Cues, *Mathematische Schriften.*]

Léonard de Vinci qui, en tant que peintre, scientifique, ingénieur, architecte, sculpteur, musicien et bien d'autres choses encore, étudia avec grand soin l'homme et la nature, connaissait bien ces idées nouvelles. Ce qu'il recherchait fondamentalement, c'était la légitimité intrinsèque de la nature. Inspiré par la méthode de Léonard, Möckel transposa à la construction d'un violon ce qui avait été élaboré sur la construction géométrique du corps humain à l'époque de la Renaissance. L'écartement de la main gauche, du pouce à l'index, lui servit de mesure standard (*diapason*) et de point de départ. Cette distance est le *diapason* de l'instrument à construire, c'est-à-dire du chevalet à l'extrémité de la caisse de résonance. La nouvelle construction géométrique de Möckel est composée de deux pentagones inversés à l'intérieur desquels se situe un carré. A partir de cela, il développa trois petits triangles rectangles constituant la base de construction de tous les autres détails (cf. **Appendice** p. 39).

De plus, nous observons, dans tous les instruments de la famille des violons, une courbure multiple, inchangée depuis cinq siècles. En regardant l'instrument de l'extérieur, on peut observer une de ces



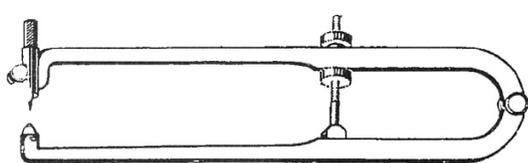
La diapason est la distance entre le chevalet et le coin supérieur du corps du violon.

courbures dans la forme de la voûte du fond et de la table d'harmonie. Toutefois, une autre courbure n'est visible que pour l'œil du luthier car elle se trouve dans l'épaisseur du bois. En effet, le bois est plus épais près du chevalet que vers les bords. Par contre, les côtés sont constitués d'une étroite bande de bois dont l'épaisseur ne varie pas.

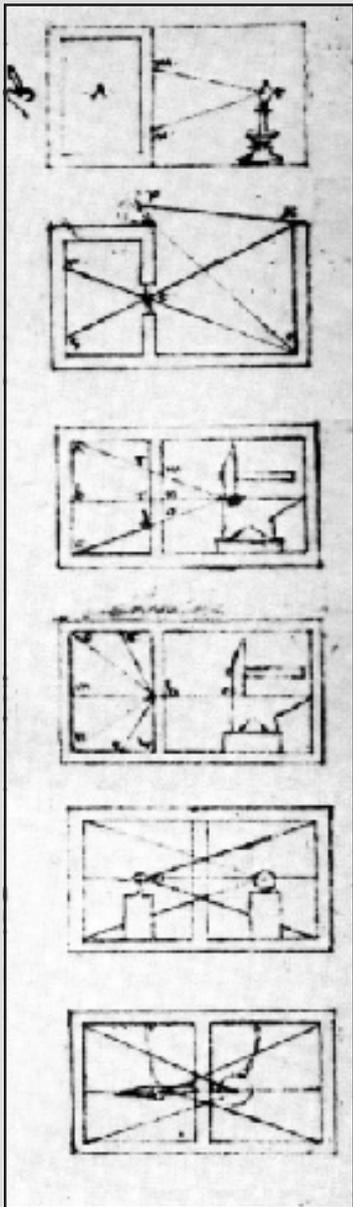
On peut facilement vérifier la signification remarquable de la courbure du bois avec une expérience sur un verre à pied. Si l'on prend un verre à pied épais à sa base et s'amincissant vers les bords, et qu'on le fait sonner, on créera un son beau, puissant et long. Si l'on fait sonner un verre à pied à épaisseur constante, on obtiendra seulement un « bruit » déplaisant.

Tout au long des années de recherche sur les anciens violons italiens, Möckel ne cessa de confirmer, jusqu'au moindre détail, la proportion de la forme cintrée à partir de laquelle il développa son concept de construction. Pour cela, son frère, Otto, l'aïda en redécouvrant le « compas d'épaisseur » trouvé parmi les outils laissés par Antonio Stradivari et utilisé par les anciens luthiers pour dessiner des contours réguliers et construire des courbes cintrées.

Si l'on devait faire une coupe horizontale à travers un terrain montagneux, on obtiendrait des « lignes de côte » semblables à celles produites par les mesures géodésiques que l'on



Le compas d'épaisseur de Möckel, que son frère Otto redécouvrit parmi les outils de Stradivari. A gauche, la pointe traceuse.



Série d'expériences mise en croquis par Léonard de Vinci. Il compare la transmission de la lumière (a), du son (b) et du magnétisme (c). Concernant la lumière, il remarque « comment les lignes, où plutôt les rayons de lumière ne pénètrent que les corps transparents ». Pour le son : « comment les lignes pénètrent une cloison », et « la voix de l'écho ». Pour le magnétisme : « comment les lignes de l'aimant et celles du fer pénètrent les cloisons mais le plus léger des deux est attiré par le plus lourd », et « quand les poids sont identiques, les deux éléments s'attirent mutuellement à force égale ».

voit sur les relevés topographiques.

Les surfaces du violon, de l'alto et du violoncelle sont incurvées de façon irrégulière de l'extérieur vers le centre. Bien entendu, le corps du violon n'est pas une planche de bois massif dans laquelle on pourrait faire une coupe horizontale afin d'étudier ces courbes cintrées qui nous intéressent. L'intérieur du violon est creux. La caisse de résonance est constituée de deux surfaces incurvées, et c'est de ces caractéristiques que dépend la sonorité de l'instrument. Par conséquent, on doit inverser le processus : on doit mesurer la voûte d'un instrument déjà construit et la dupliquer en creusant une planche de bois massif.

Otto Möckel « inventa » ensuite une manière de copier les lignes de contour de tous les instruments anciens. Il décrit ainsi sa méthode de travail à l'aide du compas d'épaisseur : « On doit supposer qu'ils [les anciens luthiers] ajustaient les parties non finies entre les branches du compas de telle manière que la pointe du crayon fasse un angle droit parfait avec la voûte du violon, puis [ils] les déplaçaient légèrement. Ensuite, [ils] déplaçaient doucement le compas autour de la voûte qui n'avait pas encore été aplanie, et donc ils faisaient des marques à une certaine hauteur seulement, et la courbe ainsi dessinée montrait, même à l'œil non exercé, tous les défauts et les contours mal placés de la voûte. On peut facilement rectifier les erreurs en utilisant un petit rabot finement ajusté pour transformer les coins des lignes laides en courbes nobles. Ensuite, on utilise à nouveau le compas, réajusté, et l'on recommence. Plus on trace de courbes avec le compas à des hauteurs différentes, plus les défauts apparaissent. »

Ainsi, la construction des courbures est essentielle pour une distribution optimale du son sur le fond et la table d'harmonie du violon. Les luthiers utilisent aujourd'hui le procédé de Möckel pour copier aussi précisément que possible les courbures des anciens violons italiens.

Le monde fascinant des ondes sonores

Afin de comprendre pleinement

pourquoi ces instruments produisent un son splendide, on doit s'intéresser à la physique des ondes sonores. Qu'est-ce vraiment le son ? Quelle est l'origine des intervalles dans l'espace sonore pour que tous les sons ne soient pas perçus comme des *synphon*, et quelle est la source de leur création ?

La recherche dans le domaine des sons confirme clairement que la courbure conçue par les anciens maîtres italiens était idéale pour créer le son le plus puissant et le plus libre, et aussi pour supprimer certains sons stridents ou aigus.

L'espace sonore lui-même possède une « courbure » multiple. Les nombreuses ondes sonores perçues par nos oreilles, en tant que bruit ou en tant que son, sont plutôt invisibles. Cependant, certaines expériences permettent de visualiser ces ondes.

Nous ne savons pas si Léonard de Vinci mena une enquête détaillée sur l'oreille humaine ou sur l'audition proprement dite, mais on trouve de nombreux éléments dans ses carnets et ses dessins qui le suggèrent fortement. De plus, il existe un canevas pour ces expériences dans lesquelles il analysa et compara toutes sortes d'ondes.

Dans ses recherches, Léonard compara toutes des vibrations lumineuses, sonores et magnétiques les unes aux autres afin de découvrir leurs similarités. Prendre comme point de départ la recherche d'un point commun entre ces vibrations est encore presque tabou aujourd'hui. Il est admis qu'Ampère, au début du XIX^e siècle, démontra que les rayons lumineux et les rayons thermiques étaient tous deux des ondes, dont la seule différence réside dans des longueurs différentes. Nous savons maintenant que les rayons magnétiques, électriques, X, les ondes radio, etc., appartiennent tous à la même espèce de rayonnement électromagnétique. Pourtant, les ondes sonores et hydrodynamiques sont considérées jusqu'à ce jour comme appartenant à un univers régi par des lois différentes.

Les ondes sonores et hydrodynamiques offrent un vaste champ de recherche du phénomène ondulatoire. Après Léonard de Vinci, les scientifiques qui se sont intéressés à l'étude des différents types d'ondes furent les frères Ernst-Hein-

rich (1795-1878) et Wilhelm Weber (1804-1891), ainsi que Félix Savart (1791-1841), Siméon Denis Poisson (1781-1840) et Benjamin Franklin (1706-1790). Dans l'étude intitulée *Théorie ondulatoire basée sur l'expérience ou Des ondes des fluides à gouttelettes avec application aux ondes sonores et lumineuses* [*Wellenlehre auf Experimente gegründet, oder über die Wellen tropfbarer Flüssigkeiten mit Anwendung auf die Schall- und Lichtwellen*, (1825)], les frères Weber définirent le concept de pic, de creux, d'amplitude et de longueur d'onde (qu'ils appelaient « *largeur d'onde* »), et ils s'intéressèrent en particulier aux phénomènes d'interférence. En fait, ils poursuivirent la voie ouverte par Léonard.

Toutefois, que ce passe-t-il en réalité à l'intérieur d'un instrument quand le son est créé ? Et comment se répandent les ondes ? Des pouvoirs actifs mettent en mouvement les atomes ou les molécules du milieu transmetteur. Dans le bois, l'eau, les os du squelette ou le liquide lymphatique de l'oreille, ou bien dans un milieu élastique, les ondes sonores entraînent des variations locales de pression, et beaucoup de parties se mettent soudainement en mouvement comme si elles avaient reçu une seule impulsion. Dans leur étude intensive des paradoxes acoustiques et musicaux, les frères Weber avaient été inspirés par leur professeur Ernst-Florens Chladni (1756-1827). Ce dernier avait même décidé de créer, à l'instar de Benjamin Franklin, de nouveaux instruments de musique et, pour cette raison, il entreprit plusieurs expériences pour essayer de rendre visible le mouvement des ondes sur une plaque de résonance.

Dans ses travaux sur le son, Wilhelm Weber décrit les tentatives de

Chladni : « *Si l'on prend une feuille de papier circulaire, d'un diamètre d'environ 20 à 30 cm, et qu'on l'adapte sur un anneau – ou mieux, que l'on étend une membrane horizontalement au-dessus d'un grand verre qui possède un pied, que l'on répande du sable dessus et que l'on fasse résonner du verre à proximité, à 10 ou 20 cm de là – alors le sable s'assemble selon des lignes qui forment souvent des figures parfaitement régulières. [...] Comme l'a montré Chladni, pour obtenir ces sortes d'ondes, on doit maintenir la membrane en différents endroits, par exemple en deux points sur le bord et un point sur la surface elle-même [...] la membrane est placée horizontalement [...] Le tableau V, fig. 6 à 18, présente les figures les plus régulières [certaines d'entre elles sont représentées ci-dessus] formées sur la membrane vibrant légèrement. Là où la membrane n'est pas complètement tendue, il arrive alors qu'un grand nombre de lignes de sable apparaissent, comme sur la figure 19, les unes croisant les autres, qui semblent provenir de l'intersection des lignes circulaires avec les rayons.* » [Wilhelm Weber Werke, Vol. I, pp. 113-114.]

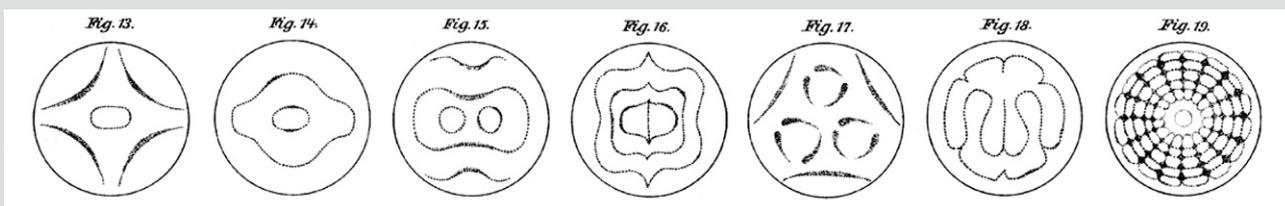
Aujourd'hui, on continue des recherches de ce type pour essayer de rendre visible l'action ondulatoire sur le fond et la table d'harmonie des violons. On utilise aussi des hologrammes laser pour visualiser les vibrations des guitares.

Otto Möckel décrit la portée des travaux de Chladni pour mieux comprendre l'espace sonore : « *Chladni a maintenant réussi à rendre visible ses figures sonores sur des plaques circulaires, rectangulaires et ovales vibrant librement. Ces figures sont produites, dans toute leur richesse et leur ampleur, quand on joue d'un instrument à archet (ou, ici, de tout instrument possédant une caisse de résonance),*

*et des sections de surface vibrent dans une multiplicité continuellement changeante. On sait que chaque note, quand on transfère avec un support ses vibrations vers une membrane ou une caisse de résonance, divise la surface en vibration en plusieurs parties (selon sa fréquence) qui ne participent pas au mouvement. [...] Si l'on dessinait les ondes vibratoires produites par différents instruments, la beauté de ces formes serait un enchantement pour les yeux. Toute création d'ondes – pas forcément sur un instrument de musique – contribue à cette mer infinie de vibrations. Il n'est même pas nécessaire de posséder une bonne imagination pour visualiser cette houle. Nous lançons un caillou dans ce bassin calme, et nous nous réjouissons de ce cercle qui se répand et nous surprend dans la danse circulaire et uniforme de ses ondes. Pensons à présent à ce cercle transformé en sphère, dont la taille augmente continuellement et qui intersectent d'autres sphères, sans qu'elles perdent leur forme. Il y a dans chaque sphère un point central, générateur d'ondes, qui forme de nouvelles ondes à courbure plus complexe. C'est la matière silencieuse qui, dans un calme mystérieux, est appelée à permettre ce miracle invisible : la beauté devient riche et abondante. Ces ondes ne sont pas intelligibles pour les yeux mais pour l'oreille. [...] » [Otto Möckel, *Die Kunst des Geigenbaus*, pp. 114 et 189.]*

L'oreille humaine et l'idée de courbure multiple

Comment l'oreille humaine perçoit-elle en réalité ces figures



Les figures sonores de Weber. Elève de Chladni, Wilhelm Weber répandit du sable sur une feuille de papier circulaire qu'il fit vibrer. Il produisit alors des figures sonores caractéristiques, que l'on peut créer de la même manière sur le corps d'un violon ou d'une guitare.

ondulatoires prodigieuses ? Un fait surprenant apparaît ici dans lequel la proportion divine joue un rôle : l'oreille interne possède une structure en hélix.

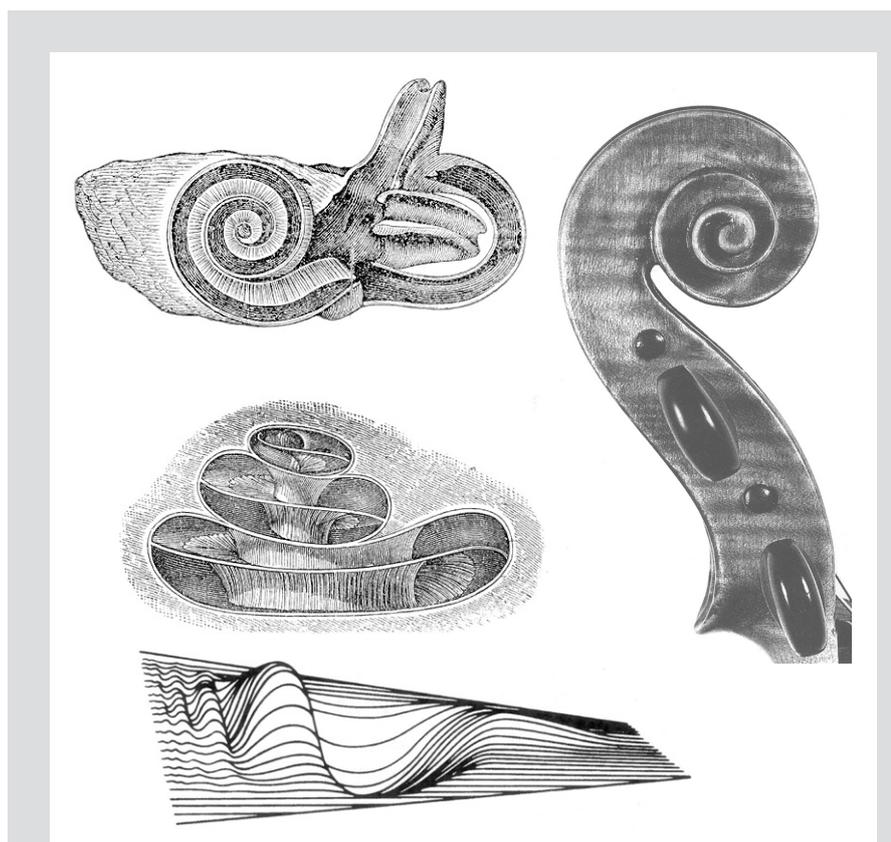
Dans la cochlée, en forme d'escargot, les vibrations qui frappent le tympan sont transmises par les osselets (marteau, enclume et étrier) vers l'oreille interne et les vibrations sonores de l'air sont transformées en signaux dans le système nerveux. Ce couplage entre énergie sonore et influx nerveux est bien connu. Toutefois, nous savons très peu de chose sur le processus conduisant à cette variété d'information ou bien aux impressions sur le système nerveux.

On peut expliquer l'importance de la cochlée par sa situation à l'intérieur du rocher, l'os le plus dur de notre corps (de même pour le labyrinthe, l'organe qui régit notre sens de l'équilibre). Il s'agit d'un système composé d'un canal

en spirale (le vestibule) et de deux canaux semi-circulaires placés côte à côte. Le canal semi-circulaire postérieur est rempli d'un liquide appelé endolymphe, riche en potassium et pauvre en sodium. Le canal semi-circulaire antérieur et le vestibule sont remplis de périlymphe, dont la composition est inverse. Cette différence crée un potentiel électrique entre les deux liquides. Entre les deux canaux semi-circulaires, il existe une membrane fibreuse appelée membrane basilaire sur laquelle se trouvent les cellules ciliées. Ces cellules agissent comme des senseurs très précis, transmettant les ondes sonores provenant de l'extérieur de manière à ce que la membrane commence à vibrer en trois dimensions. Les sons aigus tendent à stimuler principalement les cellules ciliées au début de la membrane basilaire, les sons graves les stimulent à l'autre extrémité. Les courants électriques qui se produisent sont transmis par des fibres

nerveuses reliées aux cellules ciliées le long du nerf auditif, et reliées au cerveau.

Le fait que l'organe auditif humain soit en forme de coquille spiralée n'est pas seulement symbolique, étant donné le lien légitime existant entre la musique et la géométrie. Quelle autre explication pourrait-il y avoir pour le rôle si important de la spirale dans la tête du violon depuis le début du XVI^e siècle jusqu'à aujourd'hui ? Pourquoi cet ornement en trois dimensions, du chevillier vers cette volute sculptée qui s'élargit régulièrement de façon à ce que sa plus grande largeur soit atteinte au milieu de la spirale, est-il pratiquement devenu un standard ? La spirale forme la tête de la nouvelle famille d'instruments (violon, alto, violoncelle) – peut-être renforce-t-elle les ondes ou agit-elle en les canalisant. Une chose est certaine : elle exprime la légitimité intrinsèque de la construction de l'instrument. ■



- a) Le labyrinthe dans l'os du rocher. A droite, l'organe de l'équilibre avec ses trois canaux semi-circulaires. A gauche, la cochlée, en spirale.
 b) Vue en coupe de la cochlée.
 c) Représentation de la membrane de l'oreille interne stimulée par une onde sonore.
 d) La volute du violon est faite sur le même schéma en spirale que la cochlée.

Bibliographie

1. Léonard de Vinci, *Les Carnets*, Gallimard, 1987.
2. Max Möckel, *Die Kunst der Messung im Geigenbau*, Alfred Metzner Verlag, Berlin, 1935.
3. Max Möckel, *Das Konstruktionsgeheimnis der alten italienischen Meister - Der Goldene Schnitt im Geigenbau*, Verlag der Musikinstrumenten-Zeitung Moritz Warschauer, Berlin 1925.
4. Otto Möckel, *Die Kunst des Geigenbaus*. Verlag v. Bernhard Friedr. Voigt, Leipzig, 1930.
5. Albrecht Dürer, *Unterweisung der Messung*, neu Herausgegeben von Alfred Pletzer, Süddeutsche Monatshefte GmbH, Munich, 1908.
6. Fra Luca Pacioli, *Divine proportion*, trad. de G. Duchesne et M. Giraud, Paris, Librairie du Compagnonnage, 1988.
7. Ernst Florens F. Chladni, *Kurze Übersicht der Schall- und Klanglehre, nebst einem Anhang die Entwicklung und Anordnung der Tonverhältnisse betreffend*, B. Schott's Söhne, Mainz, 1827.
8. *Großes Lexikon der Musik*, Abschnitt über Musikinstrumente von Emanuel Winternitz, Norman Lloyd, WPI, Genf, 1968
9. Emanuel Winternitz, « Leonardo da Vinci and Music », in Ladislao Reti, *The Unknown Leonardo*, McGraw Hill Book Comp., New York, 1974.
10. Josef Wechsberg, *Zauber der Geige*, S. Fischer-Verlag
11. Bartel Leendert van der Waerden, *Die Pythagoreer*, Artemis, Zürich, 1979.
12. Georg Eske, *Schall und Klang - Wie und was wir hören*, Birkhäuser Verlag, 1997.

Appendice

Construction des courbes d'épaisseur du violon

Pour la construction des courbes du violon, tout comme le degré d'épaisseur du bois du fond et de la table d'harmonie du violon, le luthier Max Möckel utilisa la section d'or.

Prenons d'abord le carré PQXY (**figure 2**) à l'intérieur duquel s'inscrit la forme du violon, consistant en trois petits rectangles. La bissectrice verticale de ce carré est exactement de la même longueur que l'espace creux du violon. Appelons cette bissectrice ML et sa perpendiculaire NO. Ainsi, nous avons deux rectangles, PQON et NOYX. Divisons maintenant les côtés verticaux PX et QY selon la section d'or. On obtient un grand segment PK et un petit segment KX, aussi bien qu'un grand segment XI et un petit segment PI. De même, si

nous divisons deux fois QY selon la proportion d'or, QH est la partie la plus grande et HY la plus petite d'une des divisions. Pour la seconde, YG est la plus grande et GQ la plus petite. Ce procédé est nécessaire parce que nous devons trouver le centre de chaque cercle qui nous fournira les courbes déterminant l'épaisseur du bois.

Relions les points K et H avec M, et les points G et I avec L. Les intersections de ces deux figures donnent les points 3 et 4. Si nous traçons dans le rectangle PQNO, les diagonales NQ et OP, nous obtenons le point d'intersection 1. La droite tracée du point 3 à Y (l'angle du carré) et celle tracée du point 4 à X donnent alors le point d'intersection 2. Les points 1 et 2 sont les centres des

cercles indispensables pour la suite de la construction.

Comme le montre la **figure 3**, KM et NQ s'intersectent au point 5, et les droites OP et MH au point 6. Si nous relient le point 7 à K, le point 8 à H, le point 5 au point 9, et le point 6 au point 10, nous obtenons les intersections C et D qui, de même, seront les centres de cercles importants. Il nous reste encore à découvrir les rayons de ces quatre cercles.

Pour cela, traçons d'abord une droite horizontale entre C et D, qui coupe la bissectrice verticale au point A. Le rayon du cercle dont le centre est le point 1 est le segment entre ce point et A. La droite horizontale HK coupe les deux côtés verticaux du rectangle central aux points 11 et 12 que nous relient en

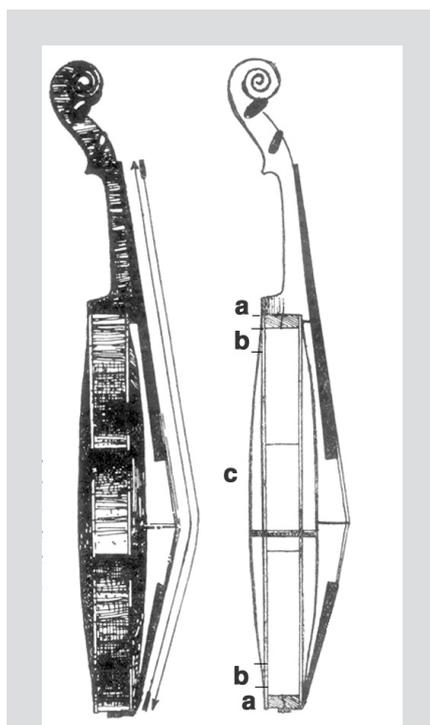


Figure 1. Vue latérale d'un violon.

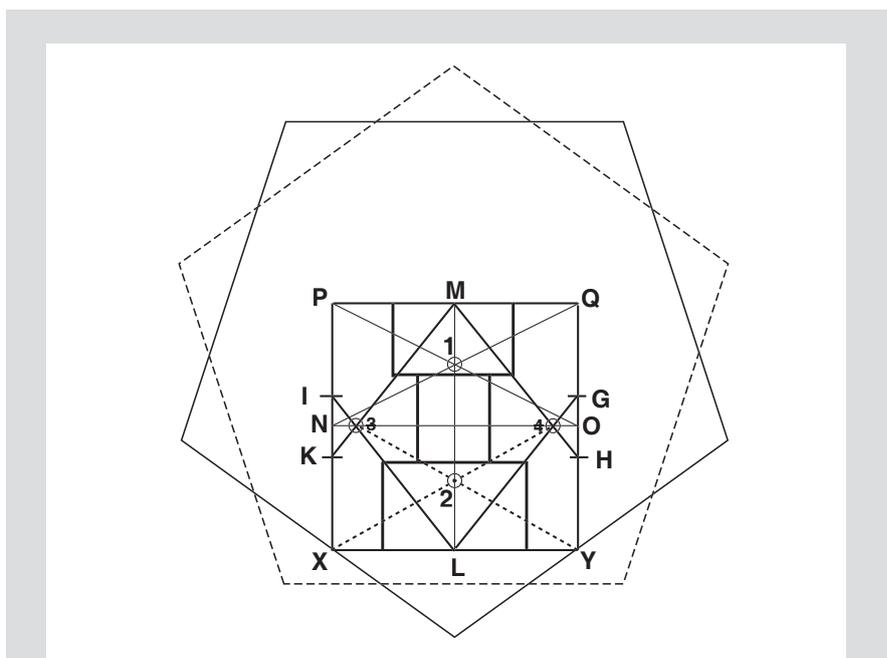


Figure 2. Construction de la section d'or. La première étape, à l'intérieur du pentagone initial, de la détermination de l'épaisseur du bois. La relation entre la bissectrice d'un pentagone et son côté est la section (ou proportion) d'or.

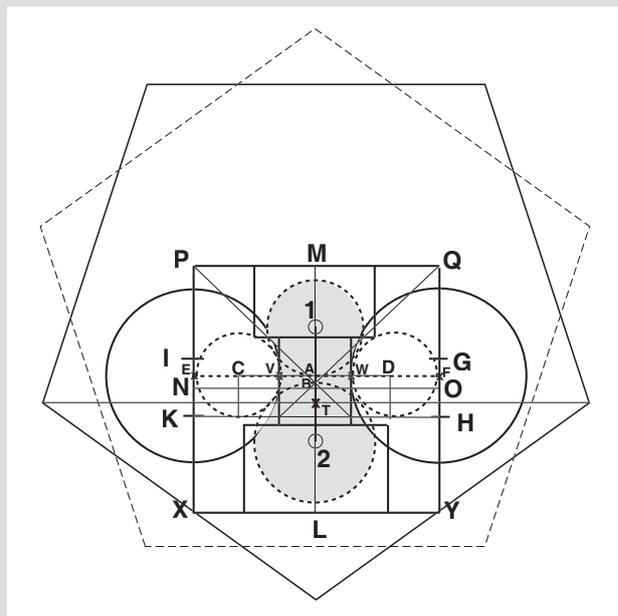
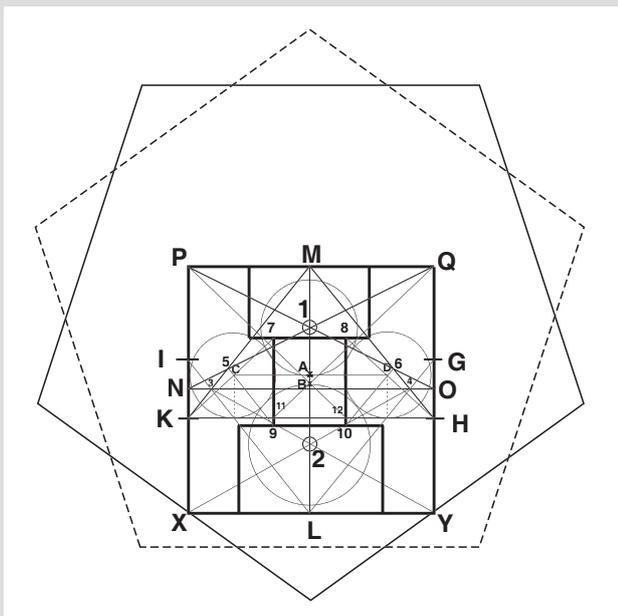


Figure 3. Construction des proportions du violon. On détermine les quatre cercles auxiliaires.

Figure 4. Construction de la table d'harmonie. Ces quatre cercles déterminent l'aire de la table d'harmonie, dont on va déterminer l'épaisseur du bois.

diagonale avec les points d'angles P et Q. Ces diagonales coupent la bissectrice au point B. Le rayon du cercle, dont le centre est le point 2, est le segment entre ce point et B.

Si l'on tire maintenant des perpendiculaires depuis C et D vers la droite horizontale HK, on obtient les rayons des cercles de centre C et D. Une construction précise fait apparaître ces cercles comme tangents aux cercles de centre 1 et 2.

Construisons les courbes d'épaisseur. Si l'on étend le segment horizontal CD de chaque côté jusqu'à son intersection avec PX et QY (**figure 4**), alors les segments VE et WF seront les rayons des cercles de centre E et F. Ces cercles chevauchent légèrement les précédents.

L'aire en grisé est celle de la table d'harmonie. On découpe alors celle-ci à partir du « patron » réalisé selon ce procédé. Quelle sera ensuite sa forme sur une vue en coupe ? Max Möckel fit des recherches sur bon nombre de vieux violons et fit les remarques suivantes : d'abord, tous les instruments sont « plats » vers les bords, où il n'y a pas de courbure sur le fond ou sur la table d'harmonie, ni de différence d'épaisseur du bois (**figures 1 et 5**) ; ensuite, les épaisseurs maximales du fond et de la table d'harmonie sont en rapport avec la proportion d'or. Möckel

écrivit : « Il y a une règle fondamentale : on doit toujours assurer la relation réciproque entre l'épaisseur du fond et celle de la table d'harmonie. Voilà comment on doit maîtriser de façon idéale la différence entre ces

courbures. C'est dans la relation de l'épaisseur de l'un à l'autre, à ma connaissance, que réside le secret principal des maîtres classiques italiens et il s'agit, de surcroît, d'une excellente explication des nombreuses épaisseurs de bois que nous trouvons dans les vieux chefs-d'œuvre italiens. » [Max Möckel, *Kunst der Messung* (Secrets de construction), p. 98 sqq.]

Comment est-il possible d'obtenir une épaisseur légitime du bois ? Pour cela, considérons l'aire en grisé de la **figure 4**. On appellera « ligne de mesure » la droite reliant les deux angles latéraux de la partie inférieure du pentagone. L'intersection de cette droite avec la bissectrice verticale sera appelée T. Traçons trois cercles concentriques autour de T (**figure 5**). Le diamètre du plus petit cercle doit être égal à la largeur du chevalet (Möckel en a expliqué ailleurs la raison, nous n'y reviendrons pas). Le cercle le plus grand est tangent au bord extérieur (indiqué par la flèche). On peut tracer arbitrairement le cercle intermédiaire, quelque part entre le plus grand et le plus petit cercle.

Traçons des cercles tangents au bord extérieur du violon, qui auront pour centre chaque point arbitraire se situant le long de la bissectrice verticale entre les points 1 et 2. L'épaisseur du bois, maximale au

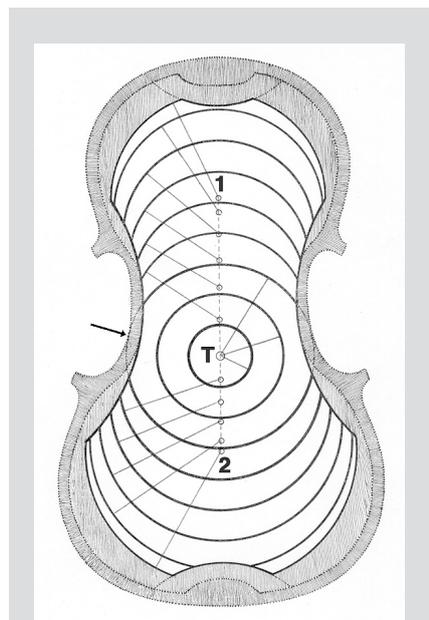


Figure 5. Plus des cercles seront tracés à l'intérieur du contour (déterminé par les quatre cercles), plus la détermination de l'épaisseur du bois sera précise.

point T, va décroître vers l'extérieur. Les cercles ayant pour centre les points 1 et 2 donnent les limites supérieures et inférieures de la zone blanche de la **figure 5**.

Enfin, nous avons encore à déterminer ce qu'il faut faire avec la table d'harmonie et le fond : quelle sera leur courbure par rapport à leur forme extérieure et quelle sera l'épaisseur du bois ? Pour cela, étendons la droite horizontale du carré PQXY vers les bords d'un plus grand carré (figure 6) et relierons les points R et S respectivement aux points 5 et 6, puis 7 et 8.

Les intersections de ces droites au-dessus et en dessous du corps du violon à Z' et Z'' sont les centres des cercles de rayon Z'5 (= Z'6), ou Z''7 (= Z''8). Ces cercles intersectent un petit arc de la surface intérieure à la base et au-dessus du violon. En utilisant les cercles construits précédemment autour de E et F, qui avaient déjà esquissé une partie de la forme de base, nous avons maintenant créé trois surfaces différentes (figure 7) :

- La portion noire montre les bords de l'instrument, qui restent plats : l'éclisse (la bande de bois entourant le violon) et les blocs du haut et du bas.

- La partie hachurée représente la surface entre le bord et la partie intérieure, où l'épaisseur du bois n'est pas précisément déterminée avant la finition, mais s'harmonise naturellement.

- La partie blanche se divise en courbes circulaires et montre les surfaces spécifiques qui doivent être travaillées, dont l'épaisseur est indiquée par les points.

En utilisant cette méthode, Möckel détermina l'épaisseur maximale du bois. La ligne GH indique l'épaisseur de la table d'harmonie. Entre G et H, reliés à Z' et Z'', nous avons une sorte d'arc très étiré, dont la largeur est proportionnelle à cette épaisseur (figure 7).

Möckel écrivit à propos de ceci : « La différence peut être infime, mais c'est encore la preuve qu'il est impossible de copier l'épaisseur du bois sans vraiment connaître la construction. Le défaut, quant à la qualité tonale, des soi-disant copies exactes, dérive la plupart du temps de ce fait. » [Max Möckel, *Kunst der Messung* (Secrets de construction), p. 59.]

Caroline Hartmann

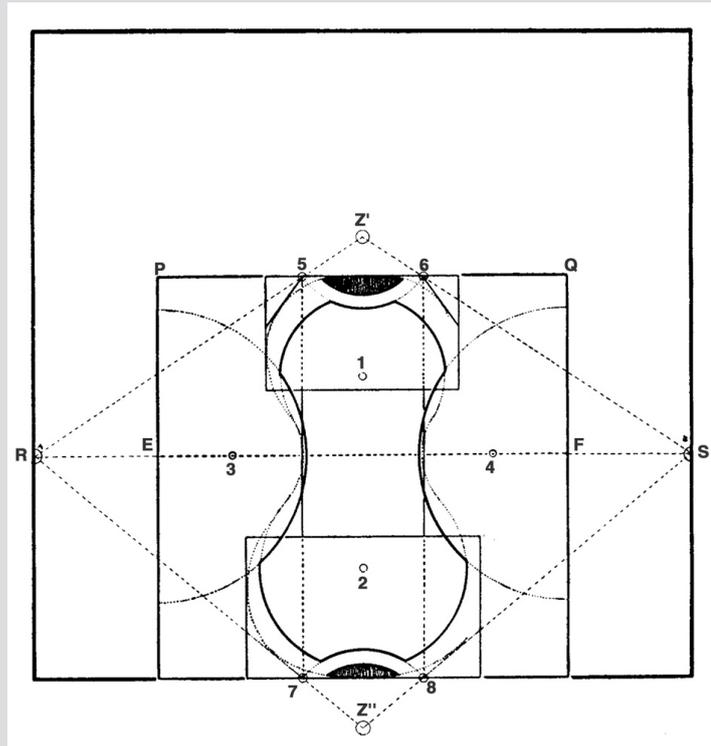


Figure 6. Construction des bords du violon. Il s'agit de la zone près des bords, qui ne possède pas de courbure ni d'épaisseur (zone a dans les figures 1 et 7).

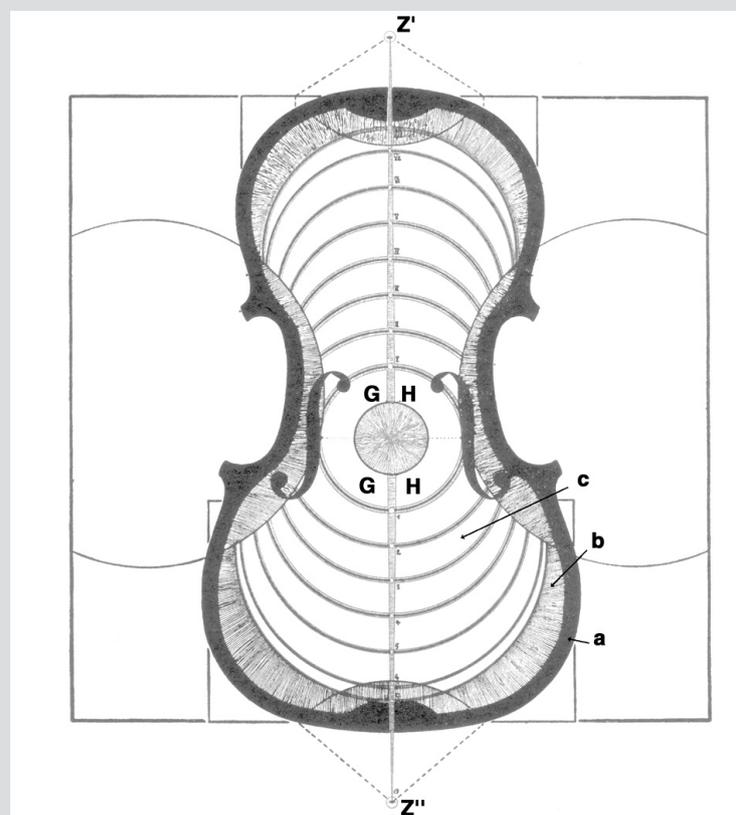


Figure 7. Les trois zones de la table d'harmonie. Ces zones a, b et c sont montrés de profil en figure 1).