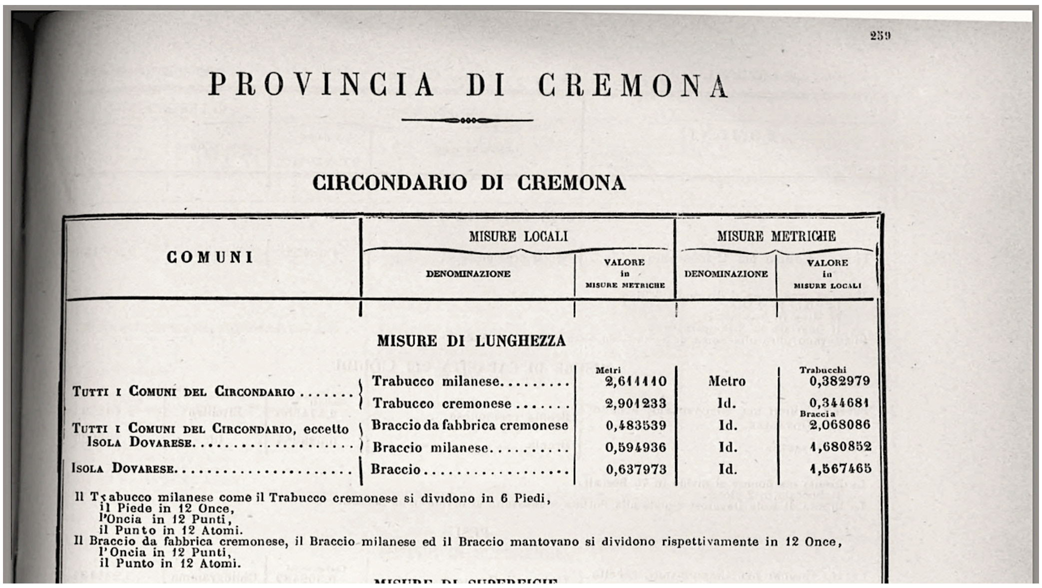
« Le moule bien harmonisé »

La logique qui gouverne la structure des violons de Stradivari reste un mystère. André Theunis, Maître Luthier à Bruxelles, et Alexandre Wajnberg, journaliste scientifique, jettent un regard neuf sur ses moules : à partir des outils et des systèmes de mesure de son temps, ils y révèlent un intriguant système de proportions simples.

Qu'est-ce qui a bien pu guider Antonio Stradivari pour le tracé de ses instruments? C'est toujours un mystère. Des études existantes sur la structure du violon donnent des réponses plutôt complexes au regard du savoir et de la pratique des luthiers des XVII[e] et XVIII[e] siècles ; d'autres études impliquent de savantes combinaisons *ad hoc* de cercles ; d'autres encore invoquent la géométrie de la section d'or… C'est peut-être le moment d'appliquer le principe du rasoir d'Ockham selon lequel « les hypothèses les plus simples doivent être préférées ou envisagées en premier ».
Nous avons ré-examiné les dimensions des moules de Stradivarius du point de vue du luthier qui baigne dans la culture artisanale et musicale de son époque et de sa ville.
En prenant en compte les outils dont il disposait, les techniques de travail du bois, les systèmes de mesures et en raisonnant logiquement dans un esprit de simplicité, nous mettons en évidence dans ses moules des sous-structures en proportions rationnelles simples, faciles à dessiner, et possédant d'importantes significations musicales et symboliques.

Les unités crémonaises

Il est bien connu que les artisans de l'époque d'Amati ne travaillaient pas en système métrique, mais utilisaient des mesures-étalon qui variaient d'une ville à l'autre.
À Crémone, l'unité de mesure était le *braccio* (en français: le *bras*). Exprimé en système métrique actuel, il valait 483,5 *mm* (selon la *Table officielle des poids et mesure*s publiée par décret royal du 20 mai 1877, **figure 1)**.



259

PROVINCIA DI CREMONA

CIRCONDARIO DI CREMONA

COMUNI	MISURE LOCALI — DENOMINAZIONE	MISURE LOCALI — VALORE in MISURE METRICHE	MISURE METRICHE — DENOMINAZIONE	MISURE METRICHE — VALORE in MISURE LOCALI
	MISURE DI LUNGHEZZA			
		Metri		Trabucchi
TUTTI I COMUNI DEL CIRCONDARIO	Trabucco milanese	2,611110	Metro	0,382979
	Trabucco cremonese	2,901233	Id.	0,344681
				Braccia
TUTTI I COMUNI DEL CIRCONDARIO, eccetto ISOLA DOVARESE	Braccio da fabbrica cremonese	0,483539	Id.	2,068086
	Braccio milanese	0,594936	Id.	1,680852
ISOLA DOVARESE	Braccio	0,637973	Id.	1,567465

Il Trabucco milanese come il Trabucco cremonese si dividono in 6 Piedi,
il Piede in 12 Once,
l'Oncia in 12 Punti,
il Punto in 12 Atomi.
Il Braccio da fabbrica cremonese, il Braccio milanese ed il Braccio mantovano si dividono rispettivamente in 12 Once,
l'Oncia in 12 Punti,
il Punto in 12 Atomi.

Figure 1 : *Table officielle des poids et mesure*s publiée par décret royal du 20 mai 1877.

Il est d'emblée étonnant de constater que la distance entre le sillet du haut et le sillet du bas (bord inférieur du violon baroque) est, selon différents auteurs, très proche de 483,5 *mm*, soit quasi égale à 1 *braccio* crémonais, le chiffre rond ! (**figure 2)**.

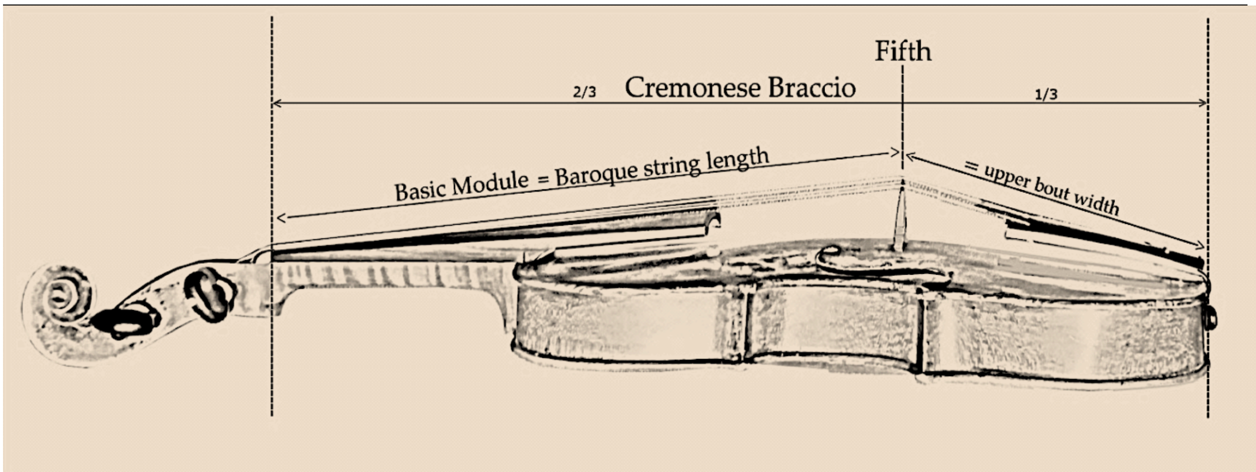


FIGURE 2 Les proportions d'un *Amati* : 1 *braccio* tout rond, de sillet à sillet ; dont 2/3 pour la corde vibrante.

Déjà dans une étude précédente (André Theunis, *Le Violon à la mesure de Cremone*, www.en.wolf-tuner.com/cremona), l'un d'entre nous montrait que la *largeur en haut* du moule PG (MS21) — 161,4 *mm* — équivaut à 1/3 du *braccio* (à 0,2 % près)... C'est ce qui l'a poussé à rechercher d'autres proportions du violon de l'école crémonaise s'exprimant en chiffres ronds, ou en fractions simples *des unités locales*.

Cette recherche s'est faite sur 10 moules de Stradivari, pièces originales accessibles aux mesures et conservés au Musée du Violon de Crémone. Nos mesures ont été prises sur les photos à l'échelle 1/1 figurant dans le *Traité de lutherie* de Francois Denis [Aladfi, 2006] et dans le livre *The Violin Forms of Antonio Stradivari*, de Stewart Pollens [Biddulph, 1992]).

Les moules de Stradivari

En lutherie, les moules servent de gabarits pour la construction de l'instrument. Ils matérialisent sa *structure intérieure*, et définissent ses proportions (**figure 3)**.
Bien que ces moules varient légèrement en dimensions, certaines constantes y sont repérables. Nous les avons découvertes en procédant différemment des approches habituelles, où l'on mesure, soit l'extérieur des violons de bord à bord, soit les moules, *tasseaux inclus*.

FIGURE 3 Le moule « PG » MS21 (photo : *Museo del Violino* de Crémone & François Denis). À noter : les quatre fines lignes perpendiculaires à l'axe central, qui joignent deux à deux les angles droits des coins et les extrémités des « *C* » (parties médianes courbes).

Nous avons mesuré la longueur des moules le long de leur axe de symétrie entre les tasseaux, *sans les inclure* dans la mesure. Et nous trouvons une longueur moyenne égale à 321,3 *mm* , soit les 2/3 du *braccio* — une fraction simple (à 0,3% près) !
Cette valeur est très proche de la longueur admise pour la corde vibrante baroque : 322 *mm* (soit 6 *mm* plus courte que la corde actuelle). La coïncidence est trop belle !
Nous faisons l'hypothèse que Stradivari a choisi cette longueur comme unité de référence, comme « module », pour le dessin de ses instruments. Les cordes vibrantes ne sont-elles pas à la source-même du son ?
Mais en raison des incertitudes sur la longueur de la corde vibrante baroque — les instruments étaient moins standardisés qu'aujourd'hui, et la majorité des manches des violons baroques ont été allongés au cours des siècles pour s'adapter aux répertoires et aux techniques modernes de jeu—, nous avons utilisé comme unité de travail, comme « module » les axes des moules (sans leurs tasseaux), base de travail solide *que nous pouvons mesurer aujourd'hui.*
Si les violons peuvent varier (épaisseurs des tasseaux, position des *f* et du chevalet...), le moule reste le « patron » stable des instruments qui seront construits sur lui : il définit bien sa géométrie.

Le moule rationnel

Des lignes (peut-être tracées par Stradivari) perpendiculaires à l'axe central sont encore visibles sur les deux faces de tous les moules examinés (**figure 3**). Elles pourraient avoir servi de marques de repères pour placer d'un même geste les extrémités K, K' et L, L' des deux *C* (**figure 4**), ce qui détermine le positionnement ultérieur des quatre coins G, G' et H, H'. Dès lors, ce que nous étudions (sur les rectos des moules), ce sont les segments de l'axe central déterminés par les points d'intersections C, D, E (et B) de ces lignes avec l'axe.

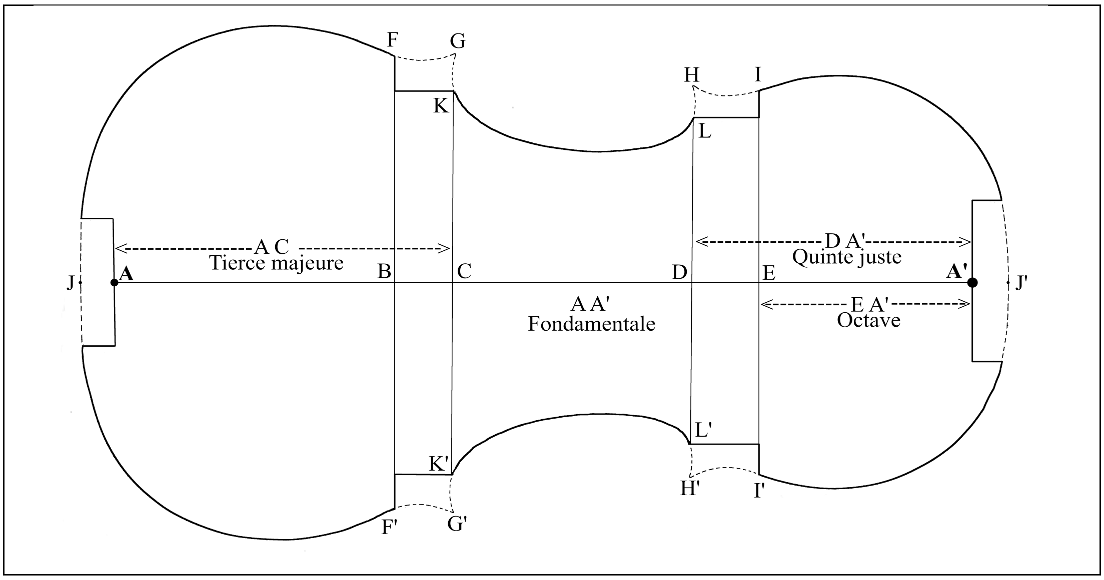


FIGURE 4 : La longueur entre les tasseaux (AA′) de l'axe de symétrie est notre *module unitaire*. C'est par rapport à celui-ci que sont comparées différentes sous-structures du moule : A′ D (pour les coins du haut H-H′), A′ E (pour les angles droits des coins du haut I-I′) et A C (pour les coin du bas G-G′). [*Tierce*, *quinte* et *octave*, v. plus loin.]

Nous avons travaillé sur les *recto* des dix moules en attribuant à chaque moule son propre module AA′ (l'axe central, tasseaux exclus) pour en examiner les proportions.
La **table 1** reprend les longueurs des axes des dix moules auxquelles sont comparés les segments déterminés par les positions (en projections orthogonales sur l'axe) des coins du haut, des coins du bas et des angles droits des coins du haut. De fortes tendances se dégagent : en moyenne, les segments mesurés valent, ici aussi, des fractions simples de leur propre module AA′.

	Les dix moules	**Axe central**	**Coins du haut**		**Coins du bas**		**Angles droits des coins du haut**	
		AA′	A′D	A′D/AA′	AC	AC/AA′	A′E	A′E/AA′
		Longueur en *mm*	Longueur en *mm*	Rapport à l'axe	Longueur en *mm*	Rapport à l'axe	Longueur en *mm*	Rapport à l'axe
1	**S (MS2)**	319,7	105,5	0,330	128,0	0,400	80,8	0,253
2	**PG (MS21)**	321,6	106,1	0,330	128,4	0,399	80,4	0,250
3	**P (MS44)**	320,7	105,6	0,329	127,0	0,396	79,5	0,248
4	**SL (MS28)**	322,0	104,9	0,326	126,8	0,394	80,4	0,250
5	**B (MS33)**	324,2	105,4	0,325	131,4	0,405	80,1	0,247
6	**S (MS39)**	320,4	106,9	0,334	126,9	0,396	78,6	0,245
7	**G (MS49)**	323,5	107,4	0,332	129,0	0,399	82,2	0,254
8	**MB (MS1)**	321,8	106,0	0,329	126,2	0,392	83,1	0,258
9	**P (B) (MS6)**	319,8	104,8	0,328	126,5	0,396	78,1	0,244
10	**B (MS38)**	319,3	103,8	0,325	128,2	0,401	77,6	0,243
	MOYENNES	**321,3** *mm*	**105,6** *mm*	**0,329**	**127,8** *mm*	**0,398**	**80,1** *mm*	**0,249**
	Moyenne des rapports à l'axe central			**0,329**		**0,398**		**0,249**
	Fraction simple la plus proche			**1/3 (0,333)**		**2/5 (0,400)**		**1/4 (0,250)**
	Incertitude relative			**à 1,2% près**		**à 0,5% près**		**à 0,4% près**

TABLE 1 : mesures de trois sous-structures des dix moules (*recto*) et moyennes des rapports à leur axe central. Les mesures sont prises sur l'arrête des moules, tasseaux exclus, avec une marge d'erreur de 0,1 *mm*.

Explicitons nos observations. La distance entre coins du haut et le bord du moule en haut (tasseau exclu) est donnée par la ligne H-H′ (reliant les coins *du haut*) qui coupe l'axe central en D. La longueur D-A′ (partie *haute* du violon) vaut 1/3 de son axe AA′, soit une fraction simple (à 1,2% près).

Il en est de même pour les coins du bas avec le bord inférieur : A-C = 2/5 de son axe (à 0,5% près).

Et pour les angles droits des coins du haut avec le bord supérieur du moule : E-A′=1/4 de son axe (à 0,4% près). (Nous n'incluons pas dans notre étude les angles droits des coins du bas — ligne FF′, distance A-B — parce que la relation avec l'axe est moins claire : proche du tiers, mais avec une moins bonne précision.)

Dans ces trois cas, nous sommes, tasseaux exclus, *très proches d'une fraction simple de l'axe central AA′*. Est-ce l'effet du hasard ? Ou l'analyse de nos mesures permet-elle d'en inférer une intention du luthier ?

Discussion

Une première approche porte sur la moyenne des 10 résultats. Celle-ci n'est qu'indicative car un effet de lissage des variations apparaît nécessairement : deux écarts à la moyenne, mais contraires l'un de l'autre, s'annulent. (Voir les lignes 5 et 6 de la **table 1** pour les coins du haut : 0,325 et 0,334, valeurs situées de part et d'autre de la moyenne 0,329). Néanmoins pour les trois sous-structures retenues, la moyenne des écarts au rapport simple — 1,2% (pour les coins du haut), 0,5% (coins du bas) et 0,4% (angle droits des coins du haut) — est déjà remarquable.

Mais il est statistiquement préférable d'examiner cet écart *moule par moule*. Et là, on constate qu'à part un ou deux moules, cet écart arrondi à deux chiffres significatifs est quasi constant! Les variations ne portent que sur la troisième décimale, ce qui correspond à une fraction de *mm*, bien inférieure à la précision de l'artisan du XVII^{e} siècle.
C'est un résultat remarquable, compte tenu du degré de précision du travail du bois à l'époque de Stradivari, de l'usure des moules (fonction de leur utilisation) et de la déformation possible du bois après plus de trois cents ans.
Ces rapports simples ne sont donc pas l'effet du hasard : le Maître crémonais, tout en poursuivant ses expérimentations, semble avoir intentionnellement conservé les différentes sections des moules en fractions rationnelles simples pour le positionnement des coins.

Par ailleurs, en comparant les lignes homologues tracées sur les rectos et les versos de chacun des dix moules, on constate des différences significatives, de l'ordre de -2,5 *mm* à +1,3 *mm* soit ±0,6% (de -0,8% à +0,4%) : ceci nous donne une indication de la marge de précision du luthier ! Or, malgré ces fluctuations, la tendance demeure.

Remarque : les « longuets » sortent clairement du lot mais, paradoxalement, confirment notre analyse (voir l'ANNEXE 1).

Pour vérifier la justesse de nos mesures, nous avons également mesuré (par la même méthode) la distance entre les points extrêmes haut et bas du moule, donc incluant les tasseaux (J-J′), et nos mesures sont en accord avec celles publiées par François Denis (*Traité de lutherie*, p. 63).

Le moule au compas

Ces intervalles sont très faciles à tracer avec les outils de l'époque : compas ; compas de proportion, appelé aussi compas de Galilée, d'utilisation courante pour les artisans et les architectes (**figure 5**) ; et la règle graduée en *oncie*, la douzième partie du *braccio*.

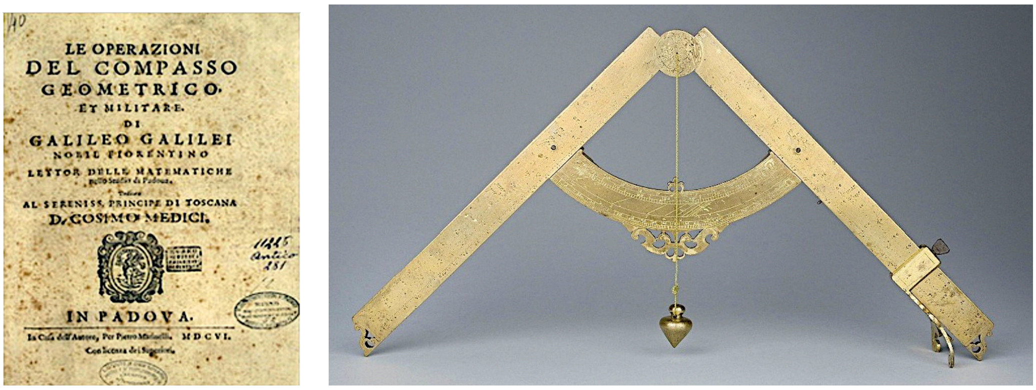


FIGURE 5 : (à gauche) Frontispice de *Le Operazioni del compasso geometrico e militare* de Galileo Galilei (Padova, 1606). (À droite) Un compas de proportion de Galilée (Museo Galileo)

À ce propos, il faut mentionner que Stradivari connaissait très bien l'architecte et géomètre Alessandro Capra, l'ex beau-père de sa première épouse Francesca Ferraboschi.

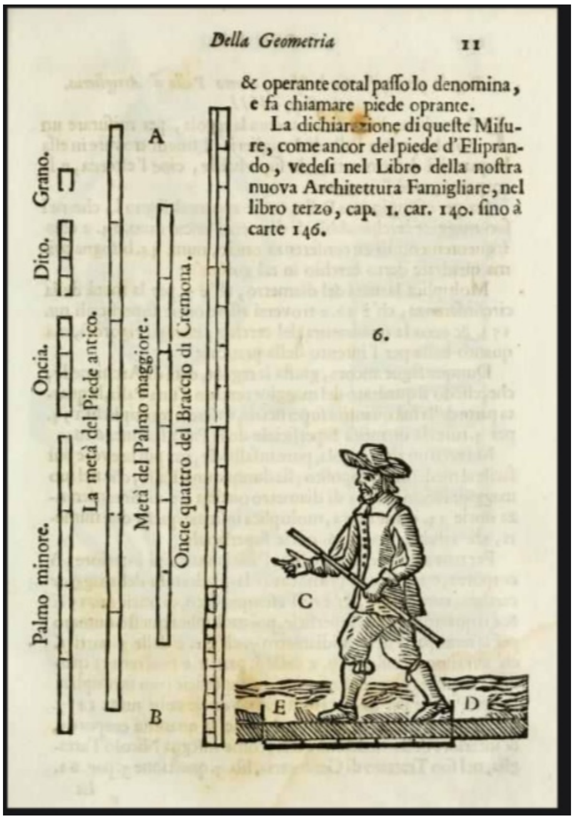


FIGURE 6 : *Geometria famigliare, et instruttione practica*, d'Alessandro Capra ; Cremona 1671 (réédition 1717).

Alessandro Capra était connu pour son ingéniosité, sa capacité de synthèse, la simplicité de ses constructions et la multiplicité de ses intérêts (architecture militaire, horloges solaires, machines de théâtre…). Il venait de publier l'un de ses traités, *Geometria famigliare, et instruttione practica*, en l'année 1671 c'est-à-dire au tout début de la « première période » d'Antonio Stradivari, qui avait tout juste 26 ans. Ils ont bu du *prosecco* pour fêter la sortie du bouquin!

Sur la page de son livre reproduite en **figure 6**, Alessandro Capra détaille les unités en usage à Crémone : *braccio, oncia, dito*… avec l'*oncia* comme douxième partie du *braccio*.

Et que constatons-nous ?

Il y a douze *oncie* de 40,3 *mm* dans le *braccio* de 483,5 *mm*. La valeur moyenne de l'axe AA' (321,3 mm) vaut 8 *oncie* à 0,3% près.
Ceci signifie qu'avec la règle graduée en *oncie* et le compas de proportion, le geste du luthier nous apparaît immédiat, et la construction des moules devient évidente.

Un dernier exemple à l'appui de notre hypothèse de simplicité se trouve dans la collection du *Museo del Violino*. Elle comporte le patron en papier d'une harpe de Stradivari (**figure 7**). Pour le pilier de cette harpe — 96,7 cm mesurés sur le patron, soit 2 braccio ! — Stradivari avait écrit «Bracia duo - 2 Lungo», des unités entières ! (André Theunis, *Le Violon à la mesure de Cremone*, www.en.wolf-tuner.com/cremona).
L'unité crémonaise de mesure utilisée par Stradivari et ses pairs semble bien être une clé renouvelant notre compréhension de la structure de ses moules.

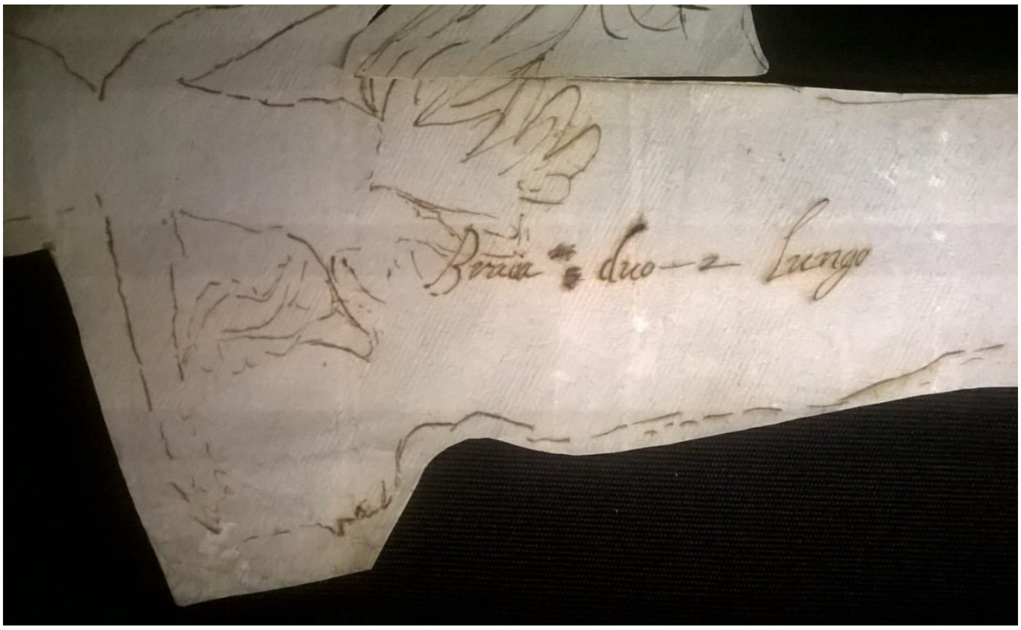


FIGURE 7 : l'inscription de Stradivari pour la hauteur de la colonne de sa harpe: *Bracia duo — 2 - Lungo*, des unités entières. (photo : Marion Pollard, Museo del Violino, Cremona)

Résumons nos résultats exprimés en millimètres et en fractions simples des différentes unités de mesures anciennes : braccia, oncie et module AA′ (**Table 2**).

						En *module AA′*	
Parties du violon baroque ou sous-structure du moule	**En *mm***	**En *braccia***	**Précision**	**En *oncie***	**Précision**	**321,3 *mm***	**Précision**
De sillet à sillet	483,5	≈ 1	-	≈ 12	-	≈ 3/2	-
Corde vibrante baroque	322	≈ 2/3	-	≈ 8	-	≈ 1	-
Axe des moules (tasseaux exclus)	321,3	2/3	0.3%	8	0.3%	1	val. exacte
Largeur du moule en haut	158	1/3	2%	4	2%	1/2	1,6%
Distance entre coins du haut et bord du moule en haut	105,6	2/9	1.7%	8/3	1.7%	1/3	1.4%
Distance entre coins du bas et bord du moule en bas	127,8	4/15	0.9%	16/5	0.9%	2/5	0.6%
Distance entre angles droits des coins du haut et bord en haut	80,1	1/6	0.6%	2	0.6%	1/4	0.3%

TABLE 2 : quelques sous-structures des moules exprimées en *mm* et en fractions simples des différentes unités de l'époque (les unités crémonaises *braccia* et *oncie* et l'unité « du luthier » — notre *module* AA′). Valeurs moyennes pour les dix moules.

Ces résultats montrent premièrement que les moules sont en proportions *rationnelles* remarquablement stables, avec des incertitudes compatibles avec la marge d'erreur constatée entre les recto et les verso des moules. Deuxièmement, qu'avec les unités de l'époque, *braccio*, *oncia* et notre *module*, ces fractions rationnelles s'expriment en *petits nombres entiers*. (Remarque : les *braccia* et les *oncie* étant liées entre elles, cela ne change rien aux proportions trouvées, ni aux erreurs relatives, mais il est pertinent de les distinguer pour des raisons de construction au compas de proportion et à la règle graduée en *oncie*.)
Mais il faut aller plus loin. L'unité la plus significative est le *module* (l'axe AA' tasseaux exclus) parce qu'il produit les fractions simples *aux nombres les plus petits*. ...avec une meilleure précision que pour les unités crémonaises !
Ceci a une profonde signification musicale, qui va conforter notre hypothèse.

Le moule harmonisé

Replaçons-nous dans l'esprit de l'époque. On savait depuis les expériences de Pythagore sur la corde vibrante que musique et nombre étaient intimement liés. Plus la corde est courte, plus la note (la fréquence de vibration) est aigüe : la fréquence vibratoire est inversément proportionnelle à la longueur. Ceci peut se décrire avec des nombres entiers et des fractions simples de la longueur de la corde : 1/2, 2/3, 3/4, etc. inversées pour donner les fréquences : 2/1, 3/2, 4/3.
Et certains de ces sons joués ensemble sont agréables à l'oreille, comme par exemple deux notes en tierce, *do* et *mi* (fréquence 1 et 5/4) ou en quinte, *do* et *sol* (1 et 3/2).

Au XVI^e^ siècle, ces conceptions ont été mathématisées, notamment par Gioseffo Zarlino (1517-1590). Détaillons : une corde deux fois plus courte (1/2) qu'une corde de référence vibre en fréquence double (2/1) pour produire l'octave supérieure, note équivalente à celle de la deuxième harmonique du son de la corde de départ. Trois fois plus courte (1/3), sa fréquence est triple pour donner la troisième harmonique (la quinte à l'octave), etc. C'est la série des « harmoniques », fondatrice du *tempérament de Zarlino*, ou *gamme naturelle* ou encore *gamme des physiciens.* Ses degrés ont été définis arithmétiquement par Zarlino mais le résultat acoustique (la gamme) est équivalent aux harmoniques de la note fondamentale ramenées (par divisions ad hoc ou par descentes en quintes) dans la première octave. (**Table 3**).

Note de la gamme :	*do*	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*do*
Longueur de la corde	1	8/9	4/5	3/4	2/3	3/5	8/15	1/2
Fréquence vibratoire	1	9/8	5/4	4/3	3/2	5/3	15/8	2

TABLE 3 : longueurs et fréquences vibratoires d'une corde construisant, à partir d'une corde unitaire quelconque jouant un *do*, toutes les notes de la gamme « naturelle ».

Cette gamme *naturelle* ainsi que d'autres, toutes basée sur des combinaisons de proportions arithmétiques simples, se sont diffusées dans toute l'Europe jusqu'à la période baroque, du vivant de Stradivari. La *gamme tempérée*, où les intervalles diatoniques sont rendus égaux mais mathématiquement *irrationnels*, ne se popularisera que bien plus tard à partir du XVIII^e^ siècle. Ce qui fait que toute sa vie, Antonio Stradivari avait baigné dans un univers musical de proportions rationnelles.

À cette époque, de telles lois de proportions s'appliquaient aussi aux arts visuels, à l'architecture, à la nature... Elles donnaient du sens au monde. Par exemple, une des théories de *L'Harmonie des sphères* permettait « d'expliquer » la circulation des planètes par l'idée que leurs différentes orbites étaient « accordées » harmoniquement : un demi-ton entre la Terre et la Lune, une tierce mineure entre Vénus et le Soleil, etc., le tout formant la gamme complète des six tons (cinq tons et deux demi-tons, **figure 8**).

FIGURE 8 : l'harmonie des sphères selon Pythagore, d'après Thomas Stanley (*The History of Philosophy*, 1660).

Ces lois des proportions rationnelles constituaient un véritable paradigme.
Et ce paradigme « harmonique » était *a fortiori* valable pour un luthier qui construit des objets sonores…

À noter qu'en architecture classique, pour satisfaire à ces lois des proportions rationnelles, il était courant de s'affranchir des unités usuelles et de se choisir un « module » spécifique pris comme unité — par exemple une façade ou le diamètre d'une colonne classique — pour guider une construction en fractions ou en multiples de ce module.
Ce principe est à l'œuvre dans les réalisations de Vitruve, Alberti, entre autres.

L'idée de choisir un module « violonistique » (l'axe AA', tasseaux exclus) pour comprendre la construction du violon est donc cohérente avec la pensée et les pratiques de l'époque.

Ayant ce contexte à l'esprit, les proportions simples trouvées dans les moules de Stradivari acquièrent une valeur « musicale » (au sens strict) hautement significative.

Commençons par la partie vibrante de la corde baroque, quasi égale aux 2/3 du *braccio*. Cela signifie que sa fréquence vibratoire, comparée à la fréquence d'une même corde longue d'1 *braccio*, vaut l'inverse de 2/3, soit les 3/2 : *musicalement*, cette corde du violon vibre à la quinte juste du *braccio* ou, si l'on peut dire, *à la quinte juste de la longueur comprise entre les deux sillets* !

Cette façon de raisonner —analogique— peut sembler hardie à nos yeux d'aujourd'hui, mais l'Histoire en fournit de nombreux exemples. Et c'est l'autre raison majeure — purement musicale — qui nous donne à penser que Stradivari a pu choisir cette longueur (AA' = 322 *mm* : *quinte de la longueur entre les deux sillets*) comme possible module-unité de construction de ses moules.

Les conséquences *harmoniques*, concernant l'équilibre architectural des moules, en sont surprenantes. L'axe longitudinal des moules (tasseaux exclus) étant pris comme module-unité, il joue donc le rôle de note fondamentale, soit la **tonique.**

Alors (v. **figure 4**) :

• <u>La largeur du moule en haut</u> qui est égale à la moitié du module, se trouve être **son octave**, l'octave de l'axe longitudinal.

• <u>La partie supérieure du violon, au-dessus des coins du haut</u>, est la **quinte juste octaviée** de l'axe. (En effet, la distance D-A' entre la ligne des coins du haut (H-H') et le bord du moule en haut (A') vaut 1/3 du module. Convertie en fréquence vibratoire, cela donne 3/1, le triple, soit la troisième harmonique de la fondamentale, ou la quinte juste octaviée.)

• <u>La partie inférieure du violon, sous les coins du bas</u>, est la **tierce majeure octaviée** de l'axe. (La distance AC entre le bord inférieur (A) du moule et la ligne des coins du bas (G-G') — soit 2/5 du module — donne en fréquence 5/2 de la fondamentale, c'est-à-dire sa cinquième harmonique descendue d'une octave (puisque divisée par deux) ; c'est la tierce majeure octaviée de l'axe.)

• <u>Enfin la partie supérieure du violon, au-dessus des *angles droits* des coins du haut</u>, est la **double octave** de l'axe. (La distance EA' entre la ligne des angles droits des coins du haut (I-I') et le bord du moule en haut (A') vaut 1/4 du module. Elle produit la fréquence quadruple, soit la double octave.)

Il est stupéfiant de constater que ces quatre dernières valeurs — octave, tierce à l'octave, quinte à l'octave, et double octave — sont précisément *celles de l'accord parfait majeur à l'octave* de l'axe central du moule!
C'est ici que s'exprime le génie « harmonique » de la conception de la famille du violon !

D'autres rapports significatifs existent dans le moule. Jean-Louis Migeot, professeur d'acoustique et d'organologie à l'ULB que nous avons consulté (et que nous remercions au passage) nous en a envoyé quelques-uns (voir l'ANNEXE 2).

Pensée analogique

La signification musicale que, dans un esprit très XVII e siècle, nous attribuons à ces proportions des moules n'implique pas que les tables et les dos des violons vibrent *comme des cordes*.
On sait aujourd'hui que les lois de la vibration acoustique en deux dimensions (pour les tables) sont bien plus complexes qu'en une dimension (pour les cordes). *Mais à l'époque, elles n'étaient pas connues.* Le luthier pouvait donc penser (par « pensée analogique ») que ces lois étaient du même ordre.

La table vibre pour projeter le son ! Elle vibre entre les tasseaux qui, d'un point de vue de luthier, jouent pour celle-ci *un rôle équivalent à celui du sillet et du chevalet pour les cordes vibrantes* (un rôle de support notamment).
Mesurer la longueur de la table en excluant ses supports « fixes » (les tasseaux) n'est pas si différent de mesurer la longueur de la partie vibrante d'une corde, entre le sillet et le chevalet !

Enfin ce n'est pas un hasard si la face avant de l'instrument — the *sound board* (en anglais)— est appelée, en français, la table *d'harmonie* et en italien la *tavola harmonica*. Proportions « harmonieuses » du dessin et fréquences sonores s'y rejoignent parfaitement.

Et le nombre d'or ?

En plus des lois de l'harmonie en proportions simples, l'architecture classique faisait aussi bon usage de la racine carrée de 2, ainsi que de la proportion dorée, la *divine proportion*. Beaucoup a été écrit sur ces valeurs irrationnelles pour comprendre l'architecture du violon. Et ces recherches restent pertinentes.

En effet, nos rapports musicaux en fractions simples ne valent que pour les moules, c'est-à-dire pour l'espace *intérieur* du violon. La longueur totale *extérieure* du corps de l'instrument de Stradivari (JJ') varie, suivant l'épaisseur des tasseaux du haut et du bas (plus ils sont épais, plus la différence entre l'axe central AA' et la longueur hors-tout est importante). Nombre d'études précédentes (comme celles de François Denis, Simone Fernando Sacconi, Stewart Pollens) en attestent. Elles permettent de comprendre l'architecture extérieure du violon comme étant gouvernée par ces paramètres architecturaux de l'époque (nombre d'Or, diagonale du carré, etc.) .

Mais concernant ces notions géométriques, il est très probable que, pour concevoir ses moules *qui vont structurer la table d'harmonie projetant le son*, le luthier se soit tourné vers le paradigme musical et ses rapports rationnels musicaux plutôt que vers celui des grandeurs irrationnelles fréquemment utilisées en architecture.

Notre recherche sur les proportions des moules n'invalide donc pas les travaux existants sur les proportions extérieures de l'instrument, mais elle les complète en ouvrant cette nouvelle perspective : pour l'extérieur la vision architecturale ; pour l'intérieur, le paradigme harmonique musical et son évidente simplicité.

Et c'est ainsi que les moules de Stradivari nous apparaissent bien harmonisés.

Conclusion

Nous avons montré que les coins sont positionnés « en tierces et quintes » par rapport à l'axe central, dans une structure du moule en « accord parfait majeur » complété d'autres intervalles de la gamme naturelle. Avec ces rapports simples de proportionnalité, le moule se construit en quelques ouvertures de compas, et ses dimensions trouvent une triple justification : artisanale (pour la simplicité de construction avec les outils et les systèmes de mesure de l'époque), vibratoire (pour les rapports musicaux) et symbolique (paradigme harmonique).

Cette logique rejoint celle déjà observée dans la boîte à chevilles des violons crémonais, et copiée par les luthiers ultérieurs (André Theunis, *The well Tuned Universe*, The Strad, juin 2019) : les positions respectives des chevilles sont, elles aussi, en harmonie musicale, présentant des tierces, des quintes, et des octaves (**figure 10**).

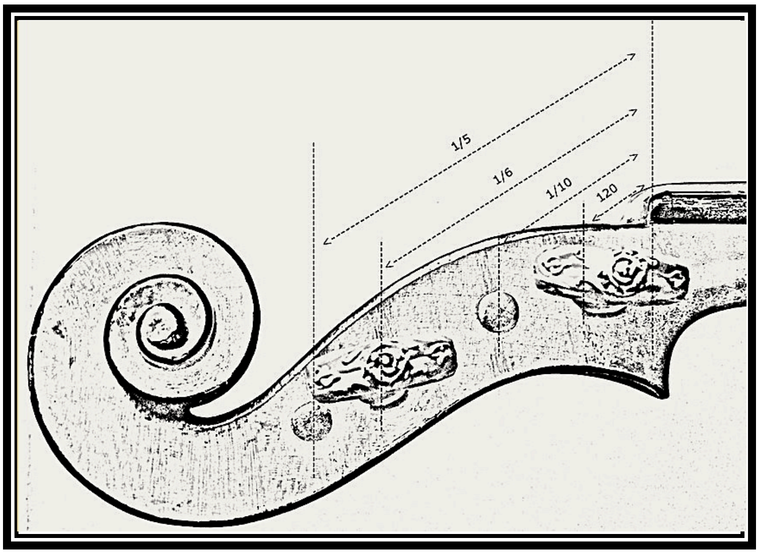


FIGURE 10 : Les chevilles ne sont pas équidistantes les unes des autres, mais disposées en fractions simples du module de base AA'. La cheville de la corde *sol* se trouve à une distance du sillet égale à 1/20^{e} du module de base ; la cheville de la corde *ré* est à 1/6^{e} ; celle du *la* à 1/5^{e} et la cheville du *mi* à 1/10^{e}.

Il est permis de penser que cette logique ne se limita pas à la seule boîte à chevilles mais gouverna la conception, le dessin et la construction de l'instrument dans son ensemble, contribuant ainsi à ses qualités sonores.

Les auteurs remercient la luthière Marion Pollard, et les professeurs Gunnar Gidion (*Albert-Ludwigs-Universität* Freiburg) et Jean-Louis Migeot (*Université Libre de Bruxelles*).

ANNEXE 1

Le cas des longuets

Un moule se distingue clairement : le "longuet" — B (MS33) — en anglais "the long Strad". Il n'a pas les mensurations "habituelles" des autres moules (**Table 1**). Son module de 324,2 mm est le plus long ; c'est celui qui s'écarte le plus de la moyenne (321,3 mm).
Les tasseaux relatifs à ce moule sont également plus épais, d'où l'allongement des violons qui en sont issus, en moyenne plus longs de 6 mm que les strads classiques (Philip Ihle et Andrea Zanrè, *Stradivari's moulds : Variations on a theme*, The Strad Magazine, mai 2019).

Ces violons (les "longuets") sont de la décennie 90, précédant la « période dorée » de Stradivari, lequel revint ensuite à ses proportions plus classiques. Le fait que les longuets furent fabriqués sur une période limitée et en petit nombre est une confirmation *a contrario* de la tendance générale observée sur les autres moules tout au long de sa production.

ANNEXE 2

Autres rapports simples dans les sous-structures du moule

Citons quelques autres rapports entre sous-structures (donnés par Jean-Louis Migeot).
— Certains se déduisent par simple soustraction de ceux déjà trouvés, et les segments sont rapportés à l'axe central AA' (**figure 4**).
— D'autres apparaissent lorsque les sous-structures du moule sont comparées entre elles.

PAR SOUSTRACTION.

1• <u>La partie inférieure et centrale du violon</u> (du bas jusqu'à l'extrémité supérieure des *C*).
C'est **la quinte (non octaviée) de l'axe**.
(Le segment AD sur l'axe, entre le bord du moule en bas et la ligne des coins du haut (H-H')
s'obtient par la soustraction AA'—A'D. En remplaçant par les proportions respectives, on obtient 1—1/3 = 2/3. En fréquence : 3/2, soit la quinte (non octaviée) de l'axe.)

2• <u>La partie centrale et supérieure du violon</u> (de l'extrémité inférieure des *C* jusqu'en haut).
C'est **la sixte majeure de l'axe**.
(Le segment CA' entre la ligne des coins du bas (G-G'') et le bord du moule en haut s'obtient par la soustraction AA' — AC. En remplaçant de même, cela donne 1 — 2/5 = 3/5.
En fréquence : 5/3 = la sixte majeure de l'axe.)

3• <u>la partie centrale du violon</u> (les « *C* »).
C'est **la 7e majeure à l'octave**, de l'axe.
(Le segment CD = AA'—AC—DA', soit 1—2/5—1/3 = 15/15—6/15—5/15 = 4/15. En fréquence : 15/4, la 15^{e} harmonique descendue de deux octaves puisque divisée par 4, donc la 7e majeure à l'octave, de l'axe.)

4• <u>L'épaisseur des coins du haut</u>.
C'est **la quinte à la 3^{e} octave**, de l'axe.
(Le petit segment DE s'obtient par DA' — A'E, soit 1/3 — 1/4 = 4/12 — 3/12 = 1/12^{e} de l'axe.
En fréquence, c'est la 12^{e} harmonique, soit la quinte à la 3^{e} octave de l'axe.)

Donc, en plus de l'accord parfait à l'octave de l'axe déjà trouvé, nous obtenons encore: la quinte et la sixte majeure non octaviées, la 7^{e} majeure à l'octave et la quinte à la troisième octave de l'axe.
Soit (en *do*) : sol , la , do_2 , mi_2 , sol_2 , si_2 , do_3 et sol_4 . Manquent le ré et le fa... Si ce n'est pas la gamme naturelle complète, on s'en rapproche !

PAR COMPARAISON ENTRE SOUS-STRUCTURES.

5• La partie inférieure du violon rapportée au segment « des *C* ».
C'est **la quinte descendante du segment des *C***.
(Pour le segment des coins du bas AC rapporté au segment CD sur l'axe,
on a AC/CD = (2/5) / (4/15) = 3/2. En fréquence : 2/3, soit la quinte (descendante) du segment « des *C* ».)

6• Le segment des coins du haut rapporté au segment « des *C* » :
C'est la **tierce majeure (descendante) du segment « des *C* »**.
(A'D/CD = (1/3) / (4/15) = 5/4. En fréquence : 4/5, soit la tierce majeure descendante.)

Il va de soi que, dès lors que certaines proportions simples sont établies, d'autres en découlent nécessairement par soustractions et comparaisons...
Mais il n'était pas nécessaire que le luthier fût au fait de toutes ces déductions dès lors qu'il disposait des éléments de base tout simples pour dessiner son moule.