

De la guitare ...

par Anne JOUSSEN,
L.T. Jean-Macé, 94400 Vitry-sur-Seine.

PRÉAMBULE.

I. INTRODUCTION.

II. LES CORDES :

1. vibrations transversales,
 - a) corde sans raideur,
 - b) corde avec raideur,
2. vibrations longitudinales,
3. vibrations de torsion,
4. action des cordes sur la caisse.

III. QUELQUES PRÉCISIONS SUR LA FABRICATION DES CORDES :

1. choix des matériaux,
2. qualités d'une corde de guitare,
 - A) qualités acoustiques,
 - B) qualités mécaniques.

IV. LA CAISSE.

V. QUELQUES ÉLÉMENTS DE LUTHERIE :

1. choix des matériaux,
 2. qualités d'une bonne guitare.
-

PREAMBULE.

Les problèmes du son, de la musique intéressent souvent beaucoup les jeunes. Mais l'acoustique a quasiment disparu des programmes depuis de nombreuses années et nous, enseignants, sommes mal armés pour répondre à leurs questions.

Cet article voudrait essayer de montrer comment un instrument de musique peut être analysé en tant qu'objet physique, quel est l'intérêt d'une approche de type mais aussi quelles en sont ses limites : en dernier ressort, ce qui détermine un « bon » son, un « bon » instrument, est affaire de goût, de personne,

d'éducation ; les critères objectifs et subjectifs sont souvent intimement liés — et c'est ce qui fait la richesse de ce sujet qui mériterait d'être mieux connu.

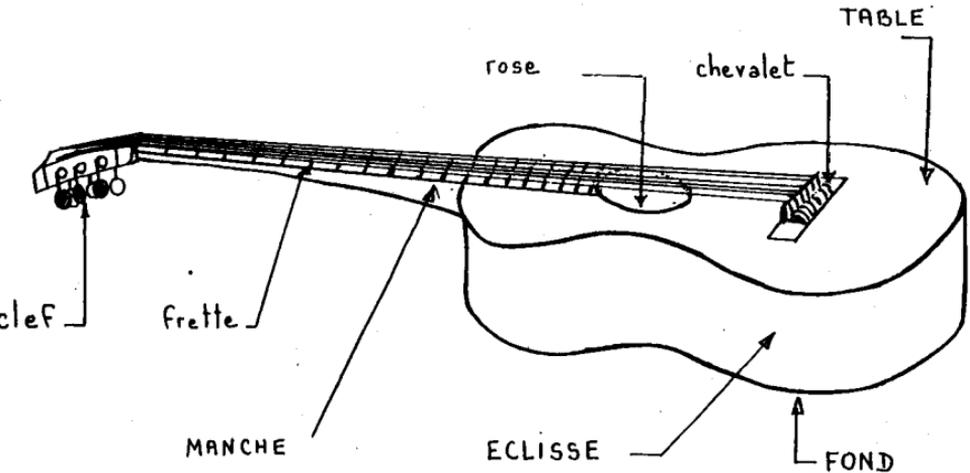
Certaines parties de cet article sont inspirées des deux bulletins sur la guitare produits par le G.A.M. (voir bibliographie) et écrits par M. FRIEDERICH, luthier et par M. LEIPP, maître de recherches au C.N.R.S.

D'autres passages doivent beaucoup aux discussions que j'ai pu avoir avec Michèle CASTELLENGO, acousticienne à l'université de Paris VI et avec Michel SIMANE, directeur technique de la fabrique des cordes SAVAREZ.

I. INTRODUCTION.

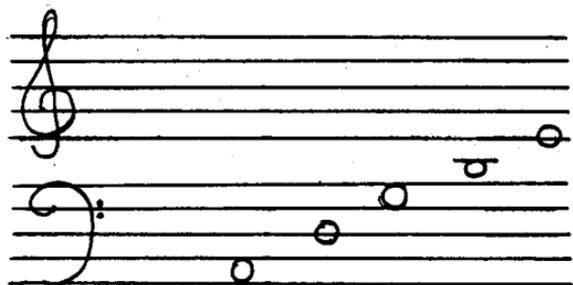
On pourrait appeler « guitare » tout instrument comportant une caisse non ovoïde, un manche, des cordes tendues parallèlement au manche, en nombre quelconque, accordées de toutes les façons possibles et pincées au doigt ou au plectre.

Mais il est important de remarquer qu'un instrument peut devenir fonctionnellement et acoustiquement tout à fait différent pour peu que l'on modifie un détail infime en apparence : il suffit par exemple de fixer les cordes au bord de la table (guitare de jazz), plutôt que sur un chevalet collé (guitare classique) pour changer tout le système acoustique, et par suite la sonorité.



Aussi traiterons-nous dans cet article principalement la guitare « classique », bien que les démarches utilisées soient essentiellement transposables.

C'est une « machine à faire des sons » formée d'une caisse de 49 cm de long environ, comportant une table et un fond quasi-plans (contrairement au luth) et des éclisses de 10 cm de haut à peu près. Les cordes ont une longueur vibrante de 65 cm et sont fixées à un chevalet collé à la table. Au nombre de 6, elles sont accordées aux notes suivantes :



mi₂ la₂ re₂ sol₂ si₂ mi₃

fréquences
approximatives
(en Hz)

82 110 147 196 247 330

Du point de vue physique, on peut distinguer deux parties :

- un système excitateur, représenté par les cordes. On leur communique de l'énergie potentielle en les écartant de leur position d'équilibre ;
- un système résonant, la caisse, qui transforme l'énergie transmise par les cordes et en cède une partie à l'air ambiant sous forme de vibrations.

Nous allons envisager séparément ces deux parties, sans oublier que leur couplage pose des problèmes difficiles, dont dépendent largement les qualités sonores de l'instrument.

II. LES CORDES.

Une corde, pincée par déplacement latéral, s'écarte de sa position d'équilibre. Lorsqu'on la relâche, elle prend un mouvement complexe : il suffit de *fixer sur elle un petit cavalier de papier (masse faible qui ne perturbe pas le système) pour observer qu'elle est non seulement le siège de vibrations transversales — les plus évidentes et les plus couramment évoquées — mais aussi de vibrations longitudinales — excitées par les allongements successifs de la corde due aux vibrations transversales — et de vibrations de torsion (surtout lorsqu'on l'attaque avec le gras du doigt).*

1. Vibrations transversales.

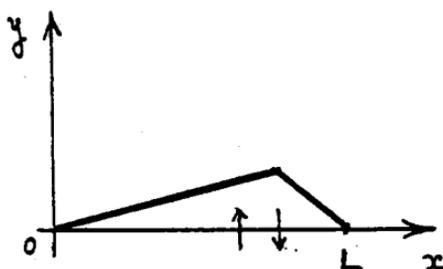


Fig. 1

Nous étudierons tout d'abord le cas limite d'une corde sans raideur, c'est-à-dire qui ne résisterait aucunement, par des réactions internes, à la flexion (il s'agirait d'une corde réduite à sa « fibre neutre ». L'action réciproque des deux parties de la corde aboutissant à un même point se réduirait à une force tangentielle, la tension en ce point).

a) CORDE IDÉALE (SANS RAIDEUR) (1).

En supposant le mouvement de la corde plan, on aboutit à l'équation classique :

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{T}{\mu} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad \begin{array}{l} T : \text{tension de la corde,} \\ \mu : \text{masse linéique.} \end{array}$$

Les ondes de déformation transversales se propagent donc à

la célérité $c = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$.

Lorsque la corde est fixée à ses deux extrémités, l'écriture des conditions aux limites et la recherche des ondes stationnaires font apparaître une périodicité dans le temps pour la fonction $y = f(x, t)$ qui décrit le mouvement de la corde.

La période τ du phénomène est telle que $c\tau = 2L$, à quoi

correspond une fréquence $f_1 = \frac{1}{\tau} = \frac{c}{2L} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$.

Le théorème de Fourier permet alors d'écrire $y = f(x, t)$ sous la forme :

$$y = \sum_{n=1}^{\infty} g_n(x) [A_n \cos(n 2\pi f_1 t) + B_n \sin(n 2\pi f_1 t)]$$

(1) Pour le détail des calculs, voir le livre de M. SOUTIF, p. 66 et 190.

avec :

$$g_n(x) = \sin n\pi \frac{x}{L}$$

Mais le mouvement de la corde conditionne le mouvement de l'air ambiant — et donc le son émis. Celui-ci peut donc être considéré comme formé d'une superposition de sons sinusoïdaux, de fréquence :

$$f_n = n f_1 = n \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

on retrouve là la justification de l'existence des harmoniques.

On peut aller plus loin dans le calcul et déterminer les coefficients A_n et B_n en supposant les conditions initiales suivantes : à $t = 0$ la corde comporte deux parties rectilignes, le point d'attaque a pour coordonnées $x = a$, $y = h$ (avec $h \ll L$) ; la corde est lâchée sans vitesse initiale.

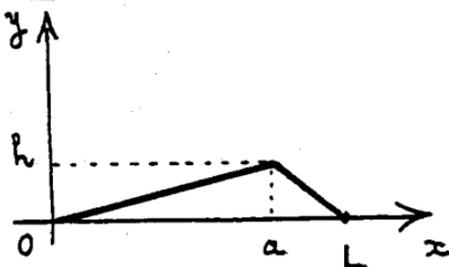


Fig. 2

On obtient alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} A_n = \frac{2 h L^2}{\pi^2 a (L - a)} \cdot \frac{1}{n^2} \cdot \sin \frac{n \pi a}{L} = \frac{K}{n^2} \sin \frac{n \pi a}{L} \\ B_n = 0. \end{array} \right.$$

• On peut remarquer que l'amplitude des harmoniques décroît en $\frac{1}{n^2}$.

Vis-à-vis de l'audition, la quantité importante est l'énergie émise qui est proportionnelle à l'énergie cinétique maximale. Pour l'harmonique de rang n :

$$W_n \sim A_n^2 (n 2\pi f_1)^2 \quad \text{donc} \quad W_n \sim \frac{1}{n^2}$$

Du fait de la rapide décroissance de W_n , le son perçu comporte peu d'harmoniques. C'est ce que l'on constate expérimentalement en faisant l'analyse harmonique du son produit par une corde tendue sur un bloc rigide.

- De plus, le terme $\sin \frac{n\pi a}{L}$ dans l'expression de A_n per-

met, par une attaque en un point d'abscisse a convenable de supprimer complètement un harmonique en obtenant

$$\sin \frac{n\pi a}{L} = 0, \text{ soit } a = k \cdot \frac{L}{n};$$

cette propriété est largement utilisée par les musiciens pour varier le timbre des sons : selon l'effet qu'ils veulent obtenir, ils modifient le point d'attaque.

Revenons sur l'expression donnant la fréquence du fondamental :

$$f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

c'est elle qui détermine la hauteur du son produit — et donc la note jouée.

On retrouve aisément que :

- *plus la tension de la corde augmente, plus la fréquence augmente : les clefs permettent de modifier la tension pour obtenir la note dérivée ;*
- *plus la longueur vibrante L diminue, plus la fréquence augmente : les frettes permettent de diminuer cette longueur vibrante ;*
- Il semble indifférent, au regard de la relation précédente, de prendre une corde fine ou grosse pour obtenir une certaine fréquence — en jouant sur la tension.

En pratique, on est limité par la résistance des matériaux (cf. III.2.B). De plus, pour la bonne tenue de l'instrument, il est avantageux que les tensions soient à peu près les mêmes pour toutes les cordes. D'où la nécessité de prendre des grosses cordes dans le grave, des fines dans l'aigu.

Pour une guitare à cordes de nylon, la tension d'une corde est environ de 60 N (si on emploie des cordes dites « à faible-tirant ») et de 80 N (avec des cordes « à fort-tirant »).

Pour une guitare à cordes d'acier, cette tension est comprise entre 100 N et 150 N, selon le type de cordes utilisées.

b) CORDES RÉELLES.

Une corde réelle présente toujours une certaine raideur. Nous allons voir en quoi celle-ci modifie les résultats que nous venons d'obtenir — et dans quels cas il est légitime de la négliger ou pas (2).

L'équation différentielle vérifiée par $y = f(x, t)$ s'écrit maintenant :

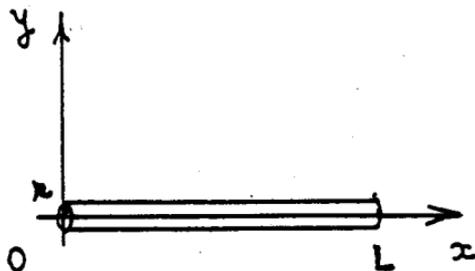


Fig. 3

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{T}{\mu} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \underbrace{a^2 \frac{\partial^4 y}{\partial x^4}}_{\text{terme correctif}}$$

avec $a^2 = \frac{E \cdot I}{\mu}$,

E : module d'Young du matériau (cf. 2),

$I = \frac{\pi}{4} r^4$ pour une corde cylindrique et homogène, de rayon r .

Lorsque a est suffisamment petit — ce qui est vérifié en pratique — l'équation précédente admet des solutions sinusoïdales de fréquences :

$$f'_n = f_n \times \left(1 + n^2 \frac{E \cdot I \cdot \pi^2}{2 T \cdot L^2} \right)$$

f_n étant la fréquence de l'harmonique n pour la corde sans raideur.

— Ces solutions particulières sont appelées les *partiels* de la corde. On peut remarquer en effet que $f'_{1(L/n)} = f'_n(L)$; autrement dit, on peut entendre la fréquence f'_n du $n^{\text{ième}}$ partiel de la corde à vide (de longueur L) en pinçant la corde réduite à la longueur L/n .

(2) Pour le détail des calculs, voir le livre de M. MERCIER, p. 126.

— Comme $f'_n \neq n f'_1$, les partiels ne sont pas les harmoniques du fondamental : c'est pourquoi les sons produits par une corde dont la raideur n'est pas négligeable sont peu agréables à entendre pour l'oreille : on dit que la corde sonne « mal ».

Par le calcul de quelques ordres de grandeur, nous allons montrer que les cordes de guitare sont conçues pour qu'en pratique, il existe peu de différences audibles entre partiels et harmoniques.

$$\text{Posons : } \varepsilon = \frac{E \cdot I \cdot \pi^2}{2 T L^2}$$

ε étant un terme correctif, ce que nous allons vérifier *a posteriori*, on peut, pour exprimer T, utiliser l'expression trouvée pour une corde sans raideur.

$$T = \mu \times (2 L f)^2 = \rho \times \pi r^2 \times (2 L f)^2$$

ρ : masse volumique.

$$\text{Nous savons que : } I = \frac{\pi}{4} r^4.$$

On peut en déduire :

$$\varepsilon = \frac{E \times T \times \pi}{128 \times \rho^2 \times L^6} \times \frac{1}{f^4}$$

Pour un matériau donné, E et ρ sont fixés ; pour une guitare déterminée, on a vu que la tension T était à peu près la même pour toutes les cordes ; ε est donc d'autant plus grand que f est petit, c'est-à-dire pour les cordes graves. C'est pourquoi les trois cordes les plus graves ($ré_2$, la_1 , mi_1) ne sont pas faites en matériau plein mais filées autour d'une « âme » fine, de façon à les alourdir sans les raidir.

En utilisant les valeurs numériques de l'Annexe 1 on obtient, avec T = 80 N,

$$\text{pour le } mi_3 \text{ nylon } \quad \varepsilon = 2,7 \cdot 10^{-6},$$

$$\text{pour le } sol_2 \text{ nylon } \quad \varepsilon = 2,2 \cdot 10^{-5}.$$

On admet qu'une oreille exercée arrive à bien distinguer un intervalle de 2 savarts, c'est-à-dire à distinguer deux fréquences f_1 et f_2 à condition que :

$$1000 \cdot \log_{10} \frac{f_2}{f_1} \geq 2 \quad \text{soit} \quad \frac{f_2}{f_1} \geq 1,0046 \text{ (cf. Annexe 2).}$$

Calculons le numéro du partiel k tel que $\frac{f'_k}{f_k} \geq 1,0046$, soit $k^2 \epsilon \geq 4,6 \cdot 10^{-3}$,

pour le mi_3 nylon $k \geq 41$,

pour le sol_2 nylon $k \geq 14$.

Mais le partiel 41 du mi_3 a une fréquence élevée (13 500 Hz) et une intensité vraisemblablement très faible du fait de son rang. Les problèmes de raideur ne se posent pas pour cette corde.

Par contre, pour le sol_2 , la différence entre potentiels et harmoniques commence à être sensible à 2 800 Hz, c'est-à-dire dans la zone la plus sensible de l'oreille.

Les musiciens se plaignent souvent auprès des fabricants de cordes que leur sol « sonne mal » !

Ainsi, en toute rigueur, à cause de la rigidité — mais aussi de l'amortissement, dont nous n'avons pas tenu compte —, les partiels d'une corde ne sont *jamais strictement* les harmoniques du fondamental. Néanmoins, il sera souvent possible de les confondre en première approximation.

2. Vibrations longitudinales.

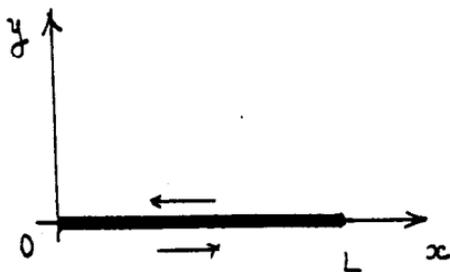


Fig. 4

Toute corde est faite dans un matériau plus ou moins extensible, caractérisé par un module d'élasticité (ou module d'Young) E .



Fig. 5

Rappelons sa signification : si la corde (de longueur L , de section s) est fixée à une extrémité et soumise à une force \vec{F} à

l'autre extrémité elle va s'allonger, du fait de son élasticité, d'une certaine longueur ΔL .

$$\text{Par définition : } E = \frac{F}{s} \cdot \frac{\Delta L}{L}.$$

On peut montrer que les ondes de déformation longitudinales se propagent à la célérité $c_{(l)} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, ρ étant la masse volumique du matériau composant la corde.

Un raisonnement similaire à celui fait pour les vibrations transversales montre que le mouvement de vibration longitudinal peut être considéré comme une superposition de mouvements sinusoïdaux de fréquence :

$$f_{(n)} = n f_{(1)} = n \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Ces fréquences sont beaucoup plus élevées que celles correspondant aux vibrations transversales.

Avec les valeurs numériques données dans l'Annexe 1, on obtient :

$$\text{pour les cordes en acier } f_{(1)} = 3\,990 \text{ Hz,}$$

$$\text{pour les cordes en nylon } f_{(1)} = 1\,040 \text{ Hz.}$$

Il est possible d'entendre le son correspondant, très aigu, en passant un doigt humide le long de la corde de façon à exciter uniquement ces vibrations longitudinales. On peut vérifier aussi que la hauteur de ce son est quasiment indépendante de la tension de la corde.

En pratique, ces vibrations sont excitées automatiquement par les vibrations transversales avec lesquelles elles sont couplées (du fait de l'allongement périodique de la corde).

Mais seuls les premiers harmoniques sont dans la bande passante de l'oreille, dont la « zone sensible » est comprise entre 500 et 5 000 Hz — et qui est totalement insensible au-delà de 20 000 Hz.

3. Vibrations de torsion.

Il est difficile, sur une guitare, de les exciter seules mais elles

apparaissent particulièrement lorsque l'on pince la corde avec le gras du doigt : on amorce nécessairement une certaine torsion.

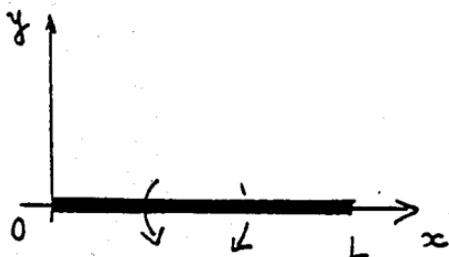


Fig. 6

La célérité avec laquelle les vibrations de torsion se propagent s'écrit : $c_{(t)} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$, G étant un coefficient, de même dimension que E , appelé module de rigidité et défini de la façon suivante :

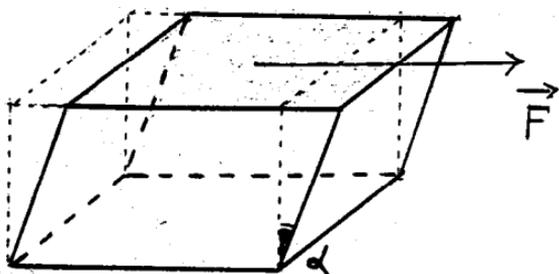


Fig. 7

Si on applique à la surface S d'un parallélépipède rectangle une force F , tangentielle, on obtient un glissement du matériau sur lui-même et les arêtes normales au plan d'application de la

force tournent d'un angle α . Par définition $G = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{F}{s}$.

Ici encore, le mouvement de vibration de torsion pourra être considéré comme une superposition de mouvements sinusoïdaux de fréquence :

$$f_{n(t)} = n f_{1(t)} = n \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

G est toujours du même ordre de grandeur que E (on a toujours $\frac{E}{3} < G < \frac{E}{2}$).

Pour l'acier : $G \simeq \frac{E}{2,6}$ d'où $f_1^{(t)} = 2\,470$ Hz.

Dans le jeu courant, l'énergie mettant en œuvre ces vibrations de tension demeure faible par rapport à celle correspondant aux vibrations longitudinales — et surtout transversales.

Ainsi, bien que les vibrations transversales soient prédominantes, le mouvement réel d'une corde de guitare en jeu normal est extrêmement complexe.

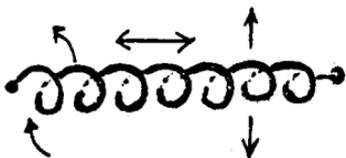


Fig. 8

Il est possible de faire sentir qualitativement cette complexité en comparant ce mouvement à celui d'un ressort fixé à ses deux extrémités : les vibrations longitudinales et de torsion apparaissent alors clairement.

Mais la difficulté du problème est accrue par le fait que les cordes ne sont pas fixées à des extrémités rigides mais à une caisse de résonance qui réagit aussi sur elles...

4. Action des cordes sur la caisse.

a) AU NIVEAU DU CHEVALET .

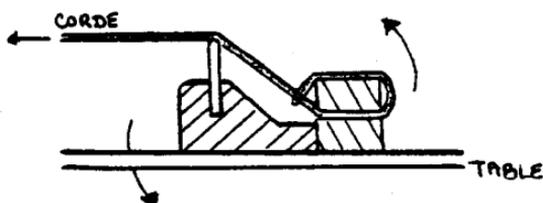


Fig. 9. — Action des cordes sur le chevalet.

La tension totale des cordes de guitare est considérable (aux environs de 400 N pour une guitare à cordes de nylon). Sous l'effet de cette traction, le chevalet a tendance à basculer : les tables de guitare sont souvent déformées, se relevant derrière le chevalet et s'enfonçant devant.

Nous pouvons remarquer que si la fréquence des vibrations transversales est f_1 , le chevalet va vibrer à la fréquence $2f_1$ (la corde a sa tension maximale deux fois par période) : c'est ce que l'on appelle la vibration d'octave. Par ailleurs, les vibrations longitudinales et de torsion vont aussi faire osciller le chevalet qui prend un mouvement complexe et ce, d'autant plus, que toutes les cordes vibrent en même temps.

b) AU NIVEAU DU MANCHE.

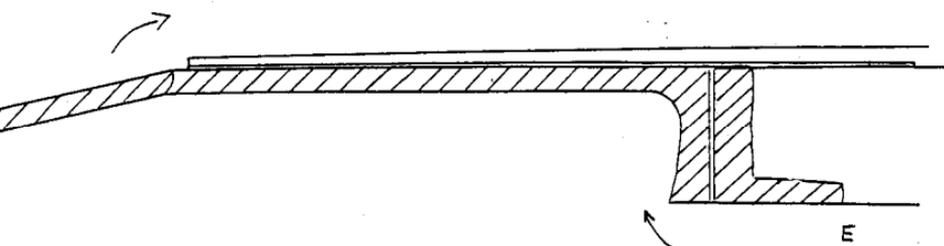


Fig. 10. — L'action des cordes sur le manche.

La traction des cordes tend à faire basculer le manche — et par suite le fond en E — entraînant parfois des déformations permanentes.

III. QUELQUES PRECISIONS SUR LA FABRICATION DES CORDES.

1. Choix des matériaux.

Les guitares classiques ont souvent leurs cordes en nylon, les trois cordes aiguës étant en nylon plein, les trois autres étant formées de brins de nylon filé (une « âme » en nylon, d'environ 0,4 mm de diamètre, est recouvert d'un filin métallique — le « trait ». Ce dernier est en cuivre argenté pour diminuer le coefficient de frottement entre spires et ainsi augmenter le temps d'amortissement de la corde).

Les guitares folk ont des cordes en acier (plein pour les cordes aiguës, filé pour les graves, le trait étant ici en laiton).

Comme on l'a vu, l'intérêt du filage est d'augmenter la masse linéique des cordes sans les rendre trop raides, ce qui provoque une inharmonicité des vibrations. Ce filage se fait à la main, l'âme étant fixée horizontalement sur un tour à grande vitesse, l'ouvrière se déplaçant avec le trait sur la longueur à filer.

Cette opération est délicate car il est indispensable que les spires soient jointives mais ne se recouvrent pas (cf. ci-après).

Les cordes en boyau de mouton ont été utilisées jusqu'en 1950. Elles ont aujourd'hui été abandonnées pour la guitare à

cause de leur fragilité et de leur grande sensibilité à l'hygrométrie ambiante (elles se raccourcissent en passant d'un air humide à un air sec).

2. Les qualités d'une corde de guitare.

A) QUALITÉS ACOUSTIQUES.

a) *Justesse.*

On dit qu'une corde est juste physiquement si, lorsqu'on la divise en n parties égales, les n parties vibrent avec la même fréquence transversale (et donc produisent la même note). Pour cela il est indispensable que la masse linéique soit la même sur toute la longueur de la corde. En pratique, on choisit un matériau homogène et on s'arrange pour que le diamètre reste constant sur toute la longueur.

C'est pourquoi on « rectifie » les cordes en nylon plein, c'est-à-dire qu'on les fait passer entre deux meules pour que leur diamètre reste constant au $1/100^e$ de mm près.

Pour les cordes filées, le filage doit être absolument régulier. En particulier, la tension du trait doit être maintenue constante tout au long de la corde.

Mais une corde juste « physiquement » ne l'est pas forcément « musicalement ». Le musicien souhaite que lorsqu'il divise la corde en deux parties égales, il obtienne l'octave de la corde à vide (c'est-à-dire une fréquence double). Mais du fait de la raideur des cordes et surtout de la surtension (cf. Annexe 3), il va obtenir, nous l'avons vu, le partiel 2 de la corde à vide, c'est-à-dire une fréquence légèrement trop grande.

Pour obtenir l'octave il faudrait, en toute rigueur, déplacer légèrement vers le manche la 12^e frette — et ce, de façon différente pour chaque corde.



Fig. 11

On pourrait opérer de même pour les autres frettes. Certains luthiers ont essayé de construire de telles guitares mais elles se sont avérées très difficiles à jouer, les frettes n'étant plus en face les unes des autres.

Une autre façon de remédier (partiellement !) au problème consiste à placer « normalement » les frettes mais à ne pas mettre



chevalet

Fig. 12

le chevalet tout à fait parallèle au sillet, de façon à augmenter, pour les cordes les plus raides, les longueurs vibrantes.

b) *Timbre.*

Il est essentiellement affaire de goût — et d'époque — et donc difficile à apprécier de manière « objective ».

En guitare classique, on cherche généralement un son « brillant » — c'est-à-dire avec beaucoup d'harmoniques élevés — sans cependant être « métallique ».

Pour comparer les timbres de différentes cordes, il est indispensable de les monter sur le même instrument — et d'attaquer les cordes de la même façon.

On peut alors enregistrer les sons obtenus et comparer les sonogrammes.

c) *Facilité d'émission.*

Les cordes doivent être « faciles à jouer ». Certains musiciens préfèrent les cordes « à fort-tirant » ($T = 80$ N pour une corde en nylon), d'autres les cordes à « faible-tirant » ($T = 60$ N).

d) *Durée du son.*

Elle est reliée au timbre car les harmoniques ne peuvent pas durer tous aussi longtemps (au XVIII^e siècle, on recherchait des cordes de luth avec beaucoup d'harmoniques mais s'éteignant très vite); elle est aussi reliée à l'amortissement de la corde et donc à la nature du — ou des — matériaux qui la composent.

e) *Couplage à l'instrument.*

Il est capital. Il ne suffit pas en effet de trouver de « bonnes » cordes et une « bonne » caisse. Il doit y avoir une adaptation mutuelle des deux parties de l'instrument.

Mais, indépendamment de leurs qualités acoustiques, les cordes sont soumises à des tensions importantes et il est indispensable qu'elles possèdent des qualités mécaniques appropriées.

B) QUALITÉS MÉCANIQUES.

a) *Résistance.*

Il n'est pas possible de tendre n'importe quelle corde à n'importe quelle tension. Si on définit la contrainte $\sigma = \frac{T}{s}$, on

trouve expérimentalement que pour chaque matériau, il existe une contrainte maximum à ne pas dépasser sous peine de rupture. En faisant apparaître cette contrainte dans l'expression de

la fréquence transversale, on obtient : $f_1 = \frac{\sigma}{2L} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}$

Ainsi pour un matériau donné — et pour une longueur vibrante fixée — il apparaît une fréquence maximale — indépen-

dante du diamètre — définie par $f_{1\max} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{\sigma_{\max}}{\rho}}$, ainsi

$$\text{pour l'acier } \sigma_{\max} \approx 2,5 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$$

$$\text{on obtient : } f_{1\max} \approx 440 \text{ Hz,}$$

$$\text{pour le nylon } \sigma_{\max} \approx 0,45 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$$

$$\text{d'où : } f_{1\max} \approx 500 \text{ Hz.}$$

C'est ce qui est vérifié expérimentalement.

Cette qualité de résistance est particulièrement importante pour les cordes filées où on met précisément une âme fine, pour diminuer la raideur. Mais comme par ailleurs plus l'âme est fine et plus le son est brillant, il y a un compromis à trouver.

b) *Durée de vie.*

Elle est reliée aux propriétés de résistance de la corde, mais pas uniquement.

Une corde en nylon « meurt » bien avant de casser car son module d'élasticité a varié. De plus, pour les cordes filées, l'en-crassement des spires dû à la transpiration, augmente le coefficient de frottement de celles-ci et donc l'amortissement de la corde qui sonne de plus en plus mal.

IV. LA CAISSE.

Pour mieux comprendre son rôle, il faut se livrer aux expériences suivantes :

EXPÉRIENCE 1 : On tend une corde de guitare entre deux étaux très rigides : la corde une fois pincée vibre très longtemps. En effet, la surface efficace de cette corde agissant sur l'air environnant pour le faire vibrer est petite. L'amortissement du mouvement est lent, et le son perçu extrêmement faible.

EXPÉRIENCE 2 : On tend de façon identique la même corde sur une guitare ; le son dure moins longtemps mais il est plus intense. En effet, la corde a communiqué son mouvement de vibration à tout l'instrument. L'énergie disponible au départ est dissipée beaucoup plus vite.

L'un des problèmes-clefs de la guitare consiste justement à répartir cette énergie disponible de telle façon que le son ait une durée considérée comme optimale musicalement parlant, la « bonne » guitare transformant l'énergie vibratoire préférentiellement dans la zone de fréquences où l'oreille est la plus sensible. Le rendement acoustique est alors maximum.

EXPÉRIENCE 3 : La guitare est posée à plat et recouverte de grains de semoule. On fait vibrer une corde : les grains se mettent à sautiller, visualisant ainsi les mouvements de la table (mouvements que l'on « sent » lorsque l'on pose la main sur la guitare).



Fig. 13

Il est même possible, si on remplace les grains de semoule par de minuscules morceaux de papier (mais il faut de la patience... car les papiers doivent être assez petits) de montrer que, pour une corde donnée, certaines parties de la table vibrent plus que d'autres. On peut ainsi repérer les zones qui vibrent surtout sous l'action de la corde mi, puis sous celle de la corde la...

Une autre expérience, qui est, d'un certain point de vue, la réciproque de la précédente, illustre le couplage intime qui peut exister entre les cordes et le corps de l'instrument.

EXPÉRIENCE 4 : Il faut disposer d'un mince ($\phi \approx 5$ à 7 mm) tube de verre creux, de dix à vingt centimètres de long, à l'extrémité duquel on a enfoncé un bouchon. Ce tube va servir d'excitateur. Il suffit pour cela de le poser (côté bouchon) sur la table et de l'effleurer avec 2 doigts mouillés dans de l'eau vinaigrée.

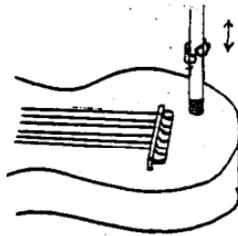


Fig. 14

On entend alors un son dont la hauteur dépend du point de la table où le tube est posé. Si on se place à un endroit qui vibrait beaucoup sous l'action de la corde la (par exemple), il y a de fortes chances pour que l'on entende précisément cette note la — ou un de ses harmoniques. Il peut même arriver que la corde la se mette à vibrer de façon importante.

De cette façon, on met en évidence que tous les points de la table n'ont pas la même fréquence propre : la « bonne » caisse doit amplifier toutes les fréquences émises par les cordes, dans le spectre audible. La courbe de réponse de l'instrument ne doit pas comporter de sur-résonances ni de trous trop importants. Il ne serait sans doute pas souhaitable qu'elle soit « complètement » plate, le son produit risquant de manquer de variétés et d'originalité.

La mise en vibration du corps de la guitare se fait de deux façons :

- de manière directe : la corde, dans ses oscillations, entraîne le chevalet (qui agit lui-même sur la table) et le manche (qui réagit sur le fond et les éclisses),
- de manière indirecte, par voie aérienne : le volume d'air vibrant créé par les déplacements de la table (induits par les mouvements du chevalet) actionne le fond et les éclisses autour de leurs fréquences propres et renvoie des ondes sonores à travers la rose. C'est sans doute pour cela qu'un auditeur placé face à l'instrument, entend un son plus intense que lorsqu'il se place de côté.

Ainsi, une « bonne » caisse doit être un ensemble harmonieux — c'est là tout l'art du luthier — comportant :

- des parties souples, propices aux mouvements lents et de grande amplitude, c'est-à-dire de fréquences propres basses (certaines parties de la table et du fond),
- des parties rigides, favorables aux mouvements rapides et de faible amplitude, dont les fréquences propres seront élevées (éclisses, manche, parties de la table proches des basses).

V. QUELQUES ELEMENTS DE LUTHERIE.

1. Choix des matériaux.

Pour la construction de cette caisse, certaines variétés de bois se sont imposées empiriquement — différentes selon les parties de l'instrument — et ce, à la fois pour des qualités physiques et esthétiques particulières. Les bois présentent en effet des propriétés extrêmement différentes selon les variétés, tant du point de vue densité que flexibilité et compressibilité. Mais pour faire une guitare, ces caractéristiques doivent être comprises entre certaines limites — ce qui élimine certains types de bois.

Par ailleurs il est souhaitable que les vibrations de la caisse se prolongent le plus longtemps possible, donc que l'amortissement soit faible. Or, celui-ci dépend de la structure interne du bois. De plus, celui-ci doit subir les déformations mécaniques qui lui sont imposées de façon réversible et donc ne pas se déformer au cours du temps.

a) LA TABLE.

Traditionnellement, deux espèces de conifères se sont imposées :

- l'épicéa d'Europe, qui donne un bois à la texture solide. La vitesse du son y est particulièrement élevée, ce qui provoque des réponses rapides de l'instrument, mais aussi un amortissement faible et un rendement optimum,
- le Western Red Cedar canadien qui est plus fragile, plus tendre mais aussi plus souple que le précédent.

Mais un autre élément joue un rôle capital dans la qualité de la table : le barrage.

Ces nervures, qui sont collées sur la table servent à la rigidifier et à la solidifier tout en permettant de l'amincir pour la rendre plus légère. Ceci permet des mouvements d'amplitude plus larges (donc favorise les graves) et des sons plus longs (les frottements internes sont moins importants dans une épaisseur de bois réduite) qu'avec une table sans barrage, qui serait forcément plus épaisse. Par ailleurs le barrage permet, en divisant en secteur la surface vibrante, la création de modes vibratoires complexes qui n'ont pas lieu lorsque la table est une simple plaque de bois. Il est ainsi possible d'amplifier beaucoup des fréquences du signal très riche donné par les cordes.

Indépendamment de l'emplacement des barres, le luthier joue également sur leur masse, leur raideur et leur profil : certaines barres, cintrées sont forcées au collage.

En définitive, chaque luthier a son propre barrage qu'il réalise sur une table très « choisie », en fonction de critères objec-

tifs mais aussi subjectifs, en vue de produire tel ou tel type de son. Cependant, les meilleurs résultats s'obtiennent souvent à la limite de résistance des bois et cela rend souvent précaire la longévité du système. C'est pourquoi les guitares actuelles ne durent pas plus de quelques dizaines d'années avec le même son.

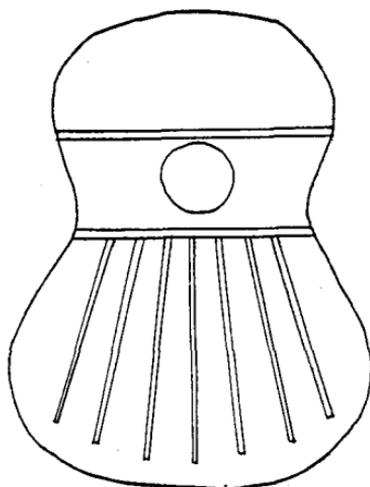


Fig. 15. — Un exemple de barrage.

b) LE CHEVALET.

Le chevalet actuel est fait en palissandre ; sa masse est environ 18 g.

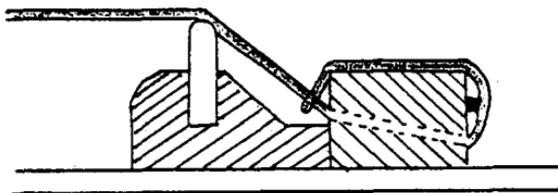


Fig. 16. — Un exemple de chevalet.

Il se comporte comme un barrage transversal de plus au milieu de la table. Aussi si on le fait trop lourd et trop rigide — en ébène par exemple — on constate un mauvais résultat sonore. L'inertie et la rigidité combinées suppriment une certaine indépendance entre le côté grave et le côté aigu de l'instrument, annulent certains modes vibratoires possible de la table

et coupent donc une série de fréquences, ce qui appauvrit l'instrument en timbre et en égalité de niveau sonore.

Le chevalet est un élément de la guitare qui a beaucoup évolué — et qui n'a pas fini de le faire : on peut réaliser des chevalets asymétriques avec une plus forte prise sur la table côté « graves », donc plus larges et plus lourds de ce côté-là — qui permettraient des graves profonds — et une partie plus étroite, plus fine côté « aigus » qui favoriseraient ces derniers. Mais cette modification n'est pas toujours admise par les guitaristes...

c) LE MANCHE.

Il est généralement en cèdre du Honduras, bois stable et léger : sa texture amortie lui permet d'arrêter, de filtrer certaines vibrations provenant de la tête qui pourraient nuire si elles se répercutaient jusqu'à la caisse en chevauchant les vibrations émises côté chevalet.

d) LE FOND ET LES ÉCLISSES.

Depuis le XVIII^e siècle, on a de plus en plus utilisé, pour construire le fond et les éclisses, du palissandre (des Indes, de Madagascar ou du Brésil), qui est un bois dense.

En effet, la masse de l'instrument a une influence sur sa sonorité : quand la guitare est lourde ($m \simeq 1\,850$ g), le bruit d'attaque de la corde, causé par le frottement du doigt, est moins perceptible que sur une guitare légère ($m \simeq 1\,600$ g). De façon générale, elle possède alors un son plus long et sa réponse est meilleure dans les aigus.

Le fond a trois fonctions :

- il maintient le talon du manche et l'empêche de basculer sous la tension des cordes,
- comme il est barré en travers de trois ou quatre barres de bois, c'est aussi un résonateur multiple, doué de résonances pour de nombreuses fréquences,
- c'est un réflecteur de son dans l'enceinte acoustique constituée par la caisse de l'instrument.

Les éclisses ont un rôle qui n'est pas négligeable puisque leur surface vibrante est sensiblement égale à celle du fond. De plus, leur hauteur conditionne le volume de la caisse, donnant ou non du « coffre » à l'instrument.

Quand le luthier est arrivé, par essais successifs, à un bon résultat, il souhaiterait pouvoir reproduire exactement l'instrument qu'il vient de fabriquer. Or, les bois sont d'une extrême diversité même à l'intérieur d'un arbre déterminé. Aussi est-il

indispensable d'avoir des bois provenant des mêmes planches que celles déjà utilisées, ce qui n'est pas évident. Mais c'est même insuffisant car on note des différences sensibles selon que les planchettes ont été prises dans le haut ou le bas du tronc. Aussi certains luthiers contrôlent systématiquement toutes leurs pièces, les pèsent, mesurent différentes caractéristiques de façon à affiner le contrôle. C'est seulement à cette condition qu'ils peuvent espérer — et ce n'est pas assuré — arriver à reproduire « à peu près » un instrument déterminé.

2. Les qualités d'une « bonne » guitare.

Il n'existe pas de guitare universelle qui pourrait convenir à tout moment et à tout le monde. Néanmoins il existe certains critères « objectifs minimaux » que doivent vérifier les guitares de qualité :

- puissance du son suffisante (de près et de loin),
- longueur du son minimale,
- émission du son facile,
- homogénéité des sons sur le plan du timbre et de la puissance,
- équilibre entre les graves et les aigus,
- contraste important entre le jeu de la rose et celui près du chevalet.

Mais dès lors que ces qualités sont présentes, le choix du musicien dépend du type de musique qu'il veut jouer, de son jeu personnel et surtout de ses goûts et de sa sensibilité, facteurs essentiellement subjectifs, et c'est cela qui rend si difficile la fabrication de « bons » instruments.

ANNEXE 1

QUELQUES VALEURS NUMERIQUES UTILES

- Longueur vibrante d'une corde de guitare : $L \simeq 0,65 \text{ m}$.
- Pour le nylon (cordes aiguës des guitares classiques) :

$$E = 1,5 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$$

$$\rho = 1,1 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$60 \text{ N} \leq T \leq 80 \text{ N}$$

\swarrow \searrow
 cordes à cordes à
 « faible - tirant » « fort - tirant »

- Pour l'acier (cordes aiguës des guitares folk) :

$$E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$$

$$\rho = 7,85 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$G \simeq \frac{E}{3}$$

100 N < T < 150 N selon le type de cordes.

- Pour des cordes dont on connaît la tension il est aisé, à

partir de la relation $f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho s}}$, de trouver le diamètre

pour des cordes en nylon, avec T = 80 N, on obtient :

| | $f_{(Hz)}$ | (nylon) $\varnothing_{(mm)}$ | (acier) $\varnothing_{(mm)}$ |
|-----------------|------------|---------------------------------|---------------------------------|
| mi ₃ | 330 | 0,71 | 0,33 |
| si | 247 | 0,95 | 0,43 |
| sol | 196 | 1,19 | 0,55 |

(pour les cordes en acier, on a pris T = 120 N).

ANNEXE 2

LES INTERVALLES

L'intervalle est l'écart de hauteur entre 2 sons.

L'unité la plus couramment utilisée en France est le savart, qui correspond au « pouvoir séparateur » de l'oreille (c'est le plus petit intervalle perceptible, dans les meilleures conditions d'écoute, par des gens très exercés).

Il est défini de la façon suivante : si deux sons ont pour fréquence f_1 et f_2 , leur intervalle, exprimé en savart, vaut :

$$1\,000 \log_{10} \frac{f_2}{f_1},$$

Exemple :

une octave correspond à un intervalle de :

$$1\,000 \log_{10} 2 = 301 \text{ savarts,}$$

un ton tempéré correspond à un intervalle de :

$$1\,000 \log_{10} \left(\sqrt[12]{2}\right)^2 = 50 \text{ savarts,}$$

(cf. Annexe 4).

ANNEXE 3

SURTENSION CREEE PAR LE PINCEMENT DE LA CORDE

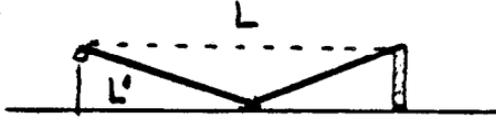


Fig. 17

Lorsqu'on applique une corde sur le manche, pour jouer une note plus aiguë que celle produite par la corde à vide, on provoque un allongement de celle-ci, et par-là même, une surtension qui modifie — légèrement — la fréquence du son émis. Nous allons évaluer, sur un exemple, cette variation.

Prenons un sol, pincé en son milieu pour produire — théoriquement — l'octave. Soit L la longueur de la corde à vide, L' sa longueur lorsqu'elle est pincée. La fréquence du son émis va s'écrire :

$$f' = \frac{1}{2 \left(\frac{L'}{2} \right)} \sqrt{\frac{T'}{\rho' s'}}$$

en appelant ρ' , s' et T' les valeurs modifiées, du fait de l'allongement.

En effet, la masse de la corde étant constante, si sa longueur varie, sa section et sa masse volumique varient en même temps, de telle sorte que $\rho \times s \times L = c^{te} = m$. Par ailleurs si la corde s'allonge de δL , cela va provoquer une surtension :

$$\delta T = s E \frac{\delta L}{L} \quad (\text{par définition de } E).$$

On peut écrire que :

$$\frac{\delta f}{f} = -\frac{\delta L}{L} + \frac{1}{2} \left(\frac{\delta T}{T} - \frac{\delta \rho}{\rho} - \frac{\delta s}{s} \right)$$

Mais comme :

$$\frac{\delta \rho}{\rho} + \frac{\delta s}{s} + \frac{\delta L}{L} = 0,$$

on obtient :

$$\frac{\delta f}{f} = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta T}{T} - \frac{\delta L}{L} \right)$$

Il est facile de montrer que $\frac{\delta L}{L} = \frac{a^2}{L^2}$ en appelant a la

hauteur de la corde à vide au-dessus du point de pincement.

Par ailleurs,

$$\frac{\delta T}{T} = \frac{s}{T} \cdot \frac{\delta L}{L}$$

avec :

$$\frac{s}{T} = \frac{1}{\rho (2Lf)^2}$$

donc :

$$\frac{\delta f}{f} = \frac{1}{2} \frac{a^2}{L^2} \left(\frac{E}{\rho (2Lf)^2} - 1 \right)$$

Cette variation relative est beaucoup plus importante pour les cordes en acier que pour celles en nylon, puisque E figure au numérateur (toutes choses égales par ailleurs). Pour comparer un peu ceci, on diminue au maximum a pour les cordes en acier ($a \approx 3$ mm contre $a \approx 4$ mm pour les cordes en nylon).

Pour un sol en nylon, on obtient : $\frac{\delta f}{f} \approx 3,8 \cdot 10^{-4}$

Pour un sol en acier : $\frac{\delta f}{f} \approx 4,4 \cdot 10^{-3}$,

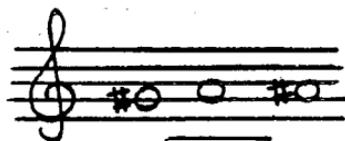
ce qui correspond environ au tiers de comma.

Pour pallier cette augmentation de fréquence, les luthiers augmentent légèrement la longueur de la partie vibrante de la corde en reculant un peu le chevalet (d'un à deux millimètres).

ANNEXE 4

LA GAMME TEMPEREE

Depuis l'Antiquité, on a imaginé d'innombrables systèmes de gammes. Nous indiquons ici simplement la gamme tempérée car mathématiquement c'est la plus simple et elle est donc pratique pour les calculs.



$\text{sol}_3 \text{ dièse}$ $\boxed{LA_3}$ $\text{la}_3 \text{ dièse}$
 fréquences $\left| \frac{440}{\sqrt{2}} = 415 \right.$ $\boxed{440}$ $466 = 440 \times \sqrt{2}$
 (Hz)

La référence est la fréquence du la_3 (440 Hz) :

On monte d'un demi-ton (la_3 dièse) en multipliant la fréquence par $\sqrt[12]{2} = 1,059$.

On descend d'un demi-ton (sol_3 dièse) en divisant la fréquence par $\sqrt[12]{2}$.

Une octave comportant 12 demi-tons, lorsqu'on monte d'une octave, la fréquence est donc multipliée par 2 (880 Hz pour le la_4).

Signalons cependant les limites de cette gamme. Si on accorde un piano en donnant à chaque note la fréquence calculée à partir de la gamme tempérée, l'instrument « sonne faux » (de l'avis des accordeurs et des musiciens et c'est lui qui compte !)(*)

(*) N.D.L.R. : Voir le B.U.P. n° 626, p. 618, l'article de F. GILOT, *Structure de la gamme occidentale*.

BIBLIOGRAPHIE

- BOUASSE. — *Cordes et Membranes*. Ed. Delagrave (1926). C'est la « Bible » en la matière. Il est malheureusement introuvable.
 - LEIPP. — *Acoustique et Musique*. Ed. Masson (1980 - 3^e éd.). Un ouvrage remarquable — et passionnant — qui aborde tous les instruments de musique.
 - MERCIER. — *Acoustique I et II*. Ed. P.U.F.
 - SOUTIF. — *Vibrations - Propagation - Diffusion*. Ed. Dunod (1970). Dans ces deux livres, on pourra retrouver le détail des calculs du II.
 - Les bulletins du G.A.M. (Groupe d'Acoustique Musicale) :
 n° 92 - FRIEDERICH. — *La guitare : historique et fondement* ;
 n° 93 - LEIPP. — *Guitare et recherche acoustique*.
- A tous ceux qu'intéresse l'acoustique des instruments de musique, nous conseillons de demander la liste des bulletins du G.A.M. au
 Droit chemin de la musique,
 5, rue Fondary, 75015 Paris.
- Le film 16 mm sonore : « *Physique et Musique : la guitare* » (C.N.D.P.).
 Conçu pour des élèves de 1^{res} A et B, il peut introduire le sujet et amener les spectateurs à se poser des questions.
-