CHAPITRE III.

THÉORIE PHYSIQUE DE LA MUSIQUE.

213. **Qualités du son musical.** — Le *son musical* est le résultat de vibrations continues, rapides et isochrones, qui produisent sur l'organe de l'ouïe une sensation prolongée. On peut toujours le comparer à d'autres sons et en prendre l'unisson, ce qui ne peut se faire pour le bruit (193).

L'oreille distingue dans le son musical trois qualités particulières : la *hauteur*, l'*intensité* et le *timbre*.

Hauteur. — La *hauteur* est l'impression qui résulte, pour l'organe de l'ouïe, du plus ou moins grand nombre de vibrations dans un temps donné. On nomme *sons graves*, ceux qui sont produits par un petit nombre de vibrations, et *sons aigus*, ceux qui sont le résultat d'un grand nombre de vibrations. Il n'y aurait donc de sons absolument graves ou aigus que ceux qui se trouveraient aux extrémités de l'échelle des sons perceptibles. Tous les sons intermédiaires ne sont graves ou aigus que d'une manière relative. Toutefois on dit un *son grave* ou un *son aigu*, comme on dit une *basse température* ou une *température élevée*, en comparant le son à ceux qu'on entend le plus ordinairement.

Le rapport de gravité ou d'acuité de deux sons se nomme *ton*, c'est-à-dire que ce mot exprime le degré de hauteur d'un son : au point de vue musical, il exprime le degré de hauteur de la gamme dans laquelle on joue.

Intensité. — On a déjà vu (198) que l'*intensité*, ou la force du son, dépend de l'amplitude des oscillations et non de leur nombre. Un même son peut conserver le même degré de gravité ou d'acuité, et prendre une intensité plus ou moins grande, lorsqu'on fait varier l'amplitude des oscillations qui le produisent. C'est ce qui arrive pour une corde tendue, suivant qu'on l'écarte plus ou moins de sa position d'équilibre.

Timbre. — Le *timbre* est ce qui fait que deux instruments différents rendant chacun un son de même hauteur et de même intensité, ces deux sons peuvent être parfaitement distingués l'un de l'autre. Le son du hautbois, par exemple, est très-distinct de celui de la flûte ; le son du cor, de celui du basson. De même la voix humaine présente un timbre bien différent, suivant les individus, l'âge ou le sexe.

La cause du timbre n'est pas bien connue. Cette qualité paraît dépendre non-seulement de la matière des instruments, mais aussi de leur forme et du mode d'ébranlement : on change complétement le son d'une trompette de laiton écroui, si on la recuit dans un four. On observe aussi que la trompette droite a le son plus éclatant que la trompette courbe.

214. **Unisson.** — Deux sons produits par un même nombre de vibrations par seconde sont dits *à l'unisson :* ils sont alors de *même hauteur*, c'est-à-dire également graves ou aigus. Par exemple, la roue de Savart et la sirène sont à l'unisson quand leurs compteurs indiquent un même nombre de vibrations dans le même temps.

On peut toujours prendre l'unisson d'un son musical, mais on ne peut prendre celui d'un bruit. C'est en mettant la sirène à l'unisson d'un corps sonore que l'on constate le nombre des vibrations de celui-ci.

Un son étant déterminé par le nombre de vibrations qui lui correspond, on peut le représenter par ce nombre. C'est en effet ce dont on est convenu pour comparer entre eux les sons ; mais, le plus souvent, au lieu de représenter les sons par leur nombre absolu de vibrations, on les représente par leur nombre relatif. Par exemple, trois sons correspondant aux nombres de vibrations 72, 144, 288, on représente le premier par 1, le second par 2 et le troisième par 4.

215. **Battements.** — Lorsque deux sons, qui ne sont pas à l'unisson, se produisent simultanément, on entend, à des intervalles égaux, un renforcement du son, qu'on nomme *battement*. Par exemple, que le nombre des vibrations, pour ces deux sons, soit 30 et 31 ; après 30 vibrations du premier, ou 31 du second, il y aura coïncidence, et, par conséquent, battement. Si les battements sont assez rapprochés pour produire un son continu, ce son sera évidemment plus grave que ceux dont il dérive, puisqu'il provient d'une seule vibration, quand les autres proviennent de 30 et 31.

216. **Accords, intervalles.** — On nomme *accord*, la coexistence de plusieurs sons produisant sur l'oreille une sensation agréable. Si, au contraire, cet organe est péniblement affecté, on dit qu'il y a *dissonance*.

L'*intervalle* entre deux sons est le rapport $\frac{n'}{n}$ des deux nombres de vibrations qui leur correspondent, n' étant toujours plus grand que n ; c'est-à-dire qu'on est convenu de prendre pour premier terme du rapport le son le plus aigu. Comme la fraction $\frac{n'}{n}$ ne change pas de valeur lorsqu'on multiplie ou divise ses deux termes par un même nombre, on voit que l'intervalle de deux sons ne dépend pas du nombre absolu de vibrations, mais seulement du nombre relatif.

L'oreille n'est agréablement affectée qu'autant que les deux termes du rapport $\frac{n'}{n}$ sont de petits nombres, et l'on dit alors qu'il y a *consonnance*. Les intervalles les plus agréables à l'oreille sont les suivants :

$$\frac{n'}{n} = 1, \text{ c'est l'}\textit{unisson},$$
$$\frac{n'}{n} = \frac{2}{1} \ \ldots\ \text{l'}\textit{octave}.$$
$$\frac{n'}{n} = \frac{5}{3} \ \ldots\ \text{la } \textit{sixte}.$$
$$\frac{n'}{n} = \frac{3}{2} \ \ldots\ \text{la } \textit{quinte}.$$
$$\frac{n'}{n} = \frac{4}{3} \ \ldots\ \text{la } \textit{quarte}.$$
$$\frac{n'}{n} = \frac{5}{4} \ \ldots\ \text{la } \textit{tierce majeure}.$$
$$\frac{n'}{n} = \frac{6}{5} \ \ldots\ \text{la } \textit{tierce mineure}.$$

Ces rapports se rencontrent fréquemment, et il importe de les retenir. Toutes les fois que les nombres de vibrations de deux sons sont entre eux comme 2 à 1, ou comme 3 est à 2, ou comme 4 est à 3...., on dit, du plus aigu, qu'il donne l'octave, la quinte ou la quarte de l'autre son; et réciproquement, si l'on dit de deux sons qu'ils forment une quarte, une tierce majeure...., cela signifie que leurs nombres de vibrations sont entre eux comme 4 est à 3, ou comme 5 est à 4, et ainsi de suite.

217. **Harmoniques.** — On nomme *sons harmoniques*, ou simplement *harmoniques*, des sons dont les nombres de vibrations sont entre eux comme la suite naturelle des nombres entiers 1, 2, 3, 4, 5, 6,.... La superposition de deux de ces sons donne un accord d'autant plus consonnant, qu'on les prend plus bas dans la série. En effet, le deuxième harmonique est l'octave du premier; le troisième, qui revient à $\frac{3}{2} \times 2$, en est la double quinte; le quatrième, qui peut s'écrire 2×2, en est la double octave; le cinquième, qui équivaut à $\frac{5}{4} \times 4$, en est la quadruple tierce. De plus, les deux premiers harmoniques donnent l'octave; le second et le troisième, la quinte; le troisième et le quatrième, la quarte; le quatrième et le cinquième, la tierce. C'est-à-dire que les harmoniques ne donnent que des accords, d'où leur vient le nom sous lequel on les désigne. Toutefois ceci n'est exact que pour les premiers sons de la série, car plus on s'élève, plus l'accord tend à se changer en dissonance.

Nous aurons occasion de revenir sur les harmoniques en étudiant les lois des vibrations des cordes et des tuyaux sonores (228 et 234). Actuellement, sachant comment on compare entre eux les sons à l'aide des nombres de vibrations qui leur correspondent, on va en voir l'application aux notes de la gamme.

218. **Échelle musicale, gamme.** — On nomme *échelle musicale*, une série de sons séparés les uns des autres par des intervalles qui paraissent avoir leur origine dans la nature de notre organisation.

Dans cette série, les sons se reproduisant, dans le même ordre, par périodes de sept, chaque période se désigne sous le nom de *gamme*, et les sept sons ou *notes* de chaque gamme, par les noms *ut, ré, mi, fa, sol, la, si*.

En comparant entre eux, soit à l'aide de la sirène (208), soit à l'aide de la roue de Savart ou de la méthode graphique de Duhamel (210 et 211), les nombres de vibrations des sept notes de la gamme, et en représentant le son le plus grave, l'*ut* fondamental, par 1, on trouve que les nombres relatifs de vibrations correspondant à ces notes sont représentés par les fractions ci-après :

[A]							
Notes.	*ut*	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*
Nombres relatifs de vibrations	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$.

Là ne s'arrête pas l'échelle musicale ; cette gamme est suivie d'une série de gammes semblables, chacune commençant par l'*ut* qui termine la précédente, et une note quelconque, dans chaque gamme, ayant pour correspondant un nombre de vibrations double de celui de la note de même nom dans la gamme qui précède; c'est-à-dire que dans chaque gamme les notes sont toutes des multiples, par les puissances croissantes de 2, des notes du même nom dans la gamme fondamentale.

219. **Intervalles des notes de la gamme, dièses et bémols.** — Les fractions qui occupent la seconde ligne du tableau [A] ci-dessus ne représentent pas seulement les nombres de vibrations relatifs par rapport à l'*ut* fondamental, mais les intervalles successifs des six dernières notes par rapport à la première. Or, si l'on cherche les intervalles entre les notes consécutives, on obtient le tableau ci-dessous :

[B]								
Notes.	*ut*	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*ut*
Nombres relatifs de vibrations	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2
Intervalles.		$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{16}{15}$.

On voit que les intervalles différents entre les sept notes de la gamme se réduisent à trois, qui sont $\frac{9}{8}$, $\frac{10}{9}$ et $\frac{16}{15}$. Le premier, qui est le plus grand, s'appelle *ton majeur ;* le second, *ton mineur,* et le troisième, qui est le plus petit, se nomme *semi-ton majeur.* De là, toutes les fois que l'intervalle entre deux sons est $\frac{9}{8}$ ou $\frac{10}{9}$, on dit qu'il y a entre eux un *ton;* et si l'intervalle est $\frac{16}{15}$, qu'il y a un *demi-ton*. On peut donc dire que les intervalles successifs de la gamme *ut, ré, mi, fa, sol, la, si, ut*, comprennent deux tons, un demi-ton, trois tons et un demi-ton.

L'intervalle entre le ton majeur et le ton mineur est $\frac{80}{81}$. C'est le plus petit intervalle que l'on considère ; il faut une oreille exercée pour l'apprécier. On le désigne sous le nom de *comma.*

Les intervalles de chaque note par rapport à l'*ut* fondamental se désignent sous les noms suivants :

$$\text{L'intervalle de } ut \text{ à} \left\{ \begin{array}{lll} ré = \frac{9}{8} & \text{s'appelle une} & \textit{seconde.} \\ mi = \frac{5}{4} & \text{. . . . . une} & \textit{tierce.} \\ fa = \frac{4}{3} & \text{. . . . . une} & \textit{quarte.} \\ sol = \frac{3}{2} & \text{. . . . . une} & \textit{quinte.} \\ la = \frac{5}{3} & \text{. . . . . une} & \textit{sixte.} \\ si = \frac{15}{8} & \text{. . . . . une} & \textit{septième.} \\ ut = 2 & \text{. . . . . une} & \textit{octave.} \end{array} \right.$$

On a déjà vu que plusieurs de ces intervalles donnent des accords consonnants (216); la *seconde* et la *septième,* exprimées par des rapports compliqués, donnent des dissonances.

La gamme dont les rapports de vibrations viennent d'être indiqués se nomme *gamme diatonique;* on appelle *gamme chromatique,* une gamme qui procède par demi-tons, et se compose de 13 sons.

Les musiciens ont été conduits à intercaler entre les notes de la gamme des notes intermédiaires qu'on désigne sous les noms de *dièses* et de *bémols*. *Diéser* une note, c'est augmenter le nombre de ses vibrations dans le rapport de 24 à 25 ; la *bémoliser*, c'est diminuer ce même nombre dans le rapport de 25 à 24. Dans la musique, le dièse est représenté par le signe $\sharp$, et le bémol par le signe $\flat$.

220. **Accords parfaits.** — On donne le nom d'*accord parfait* à trois sons simultanés tels, que le premier et le second forment une tierce majeure, le second et le troisième une tierce mineure, le premier et le troisième une quinte ; c'est-à-dire trois sons tels, que les nombres de vibrations qui leur correspondent soient entre eux comme les nombres 4, 5, 6. Cette condition est remplie par les trois notes *ut, mi, sol,* dont les nombres de vibrations sont entre eux comme 1, $\frac{5}{4}$ et $\frac{3}{2}$, ou comme 4, 5 et 6. De tous les accords, c'est le plus agréable à l'oreille ; c'est l'*accord parfait majeur.* Les trois sons 10, 12, 15, dont les intervalles sont, $\frac{6}{5}$, $\frac{5}{4}$ et $\frac{3}{2}$, et qui ne

diffèrent des précédents que par l'ordre des deux premiers, donnent l'*accord parfait mineur.*

221. **Diapason.** — Le *diapason* est un petit instrument à l'aide duquel on reproduit à volonté une note invariable ; ce qui le rend propre à régler les instruments de musique. Il consiste en une verge d'acier recourbée sur elle-même en forme de pincette (fig. 148). On le fait vibrer, soit en passant un archet sur ses bords, soit en écartant brusquement ses deux branches au moyen d'un cylindre de fer qu'on passe de force entre elles, comme le montre la figure. Les deux lames, ainsi écartées de leur position d'équilibre, y reviennent en vibrant, et produisent un son constant pour chaque diapason. On renforce le son de cet appareil en le fixant sur une caisse de bois blanc ouverte à l'une de ses extrémités.

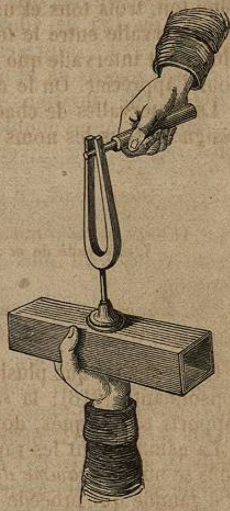


Fig. 148.

Le nombre de vibrations du diapason variant avec la longueur et l'épaisseur de ses deux branches, on le règle à l'aide de la sirène, ou mieux par le procédé graphique de Duhamel. Le nombre des vibrations simples du diapason a d'abord été de 856 par seconde ; mais comme, pour régler le ton de leurs instruments, les musiciens ne faisaient point usage de cet appareil, il est arrivé que le ton allait toujours en s'élevant sur tous les grands théâtres d'Europe, et qu'en outre il n'était pas le même à Paris, à Vienne, à Berlin, à Milan, etc. Les constructeurs portèrent alors le nombre des vibrations du diapason à 880 ; enfin, en 1859, une commission choisie à cet effet adopta un *diapason normal*, obligatoire pour tous les établissements musicaux de France. Ce diapason, dont un étalon est déposé au Conservatoire de musique de Paris, donne 870 vibrations simples par seconde. On verra ci-après quelle est la note correspondante à ce nombre.

222. **Notation des gammes, nombre absolu de vibrations.** — Le nombre absolu de vibrations qui correspond à l'*ut* fondamental de la gamme étant tout à fait arbitraire, on peut admettre un nombre indéterminé de gammes. Or, comme point de départ pour toutes les autres, on a choisi celle dont l'*ut* correspond au son le plus grave de la basse, et l'on est convenu, en physique, de distinguer

les notes de cette gamme en leur donnant l'indice $_1$; tandis qu'on donne aux notes des gammes plus élevées les indices $_2$, $_3$. .., et aux notes des gammes plus graves, les indices $_{-1}$, $_{-2}$...., c'est-à-dire qu'on écrit ut_1, $ré_1$,ut_{-1}, $ré_{-1}$ .... Par exemple, fa_2 est à l'octave aigue de fa_1, et fa_{-2} à l'octave grave.

Cela posé, on n'a considéré jusqu'ici que les nombres de vibrations relatifs, mais de ceux-ci il est facile de déduire les nombres absolus. En effet, on est convenu que le nombre 870 de vibrations simples, ou 435 de vibrations doubles, adopté ci-dessus pour le diapason (221), représente la_3. Par conséquent, les nombres de vibrations relatifs de *ut* et *la* étant 1 et $\frac{5}{3}$, si l'on représente par n le nombre de vibrations de ut_3, on doit avoir $n \times \frac{5}{3} = 435$; d'où $n = 261$ vibrations doubles. ut_3 une fois connu, on aura les autres notes $ré_3$, mi_3, fa_3..., en multipliant 261 par $\frac{9}{8}$, par $\frac{5}{4}$, par $\frac{4}{3}$... (218, A). Quant à ut_2, il égale $\frac{ut_3}{2} = 130\,\frac{1}{2}$, et $ut_1 = \frac{ut_2}{2} = 65\,\frac{1}{4}$.

La valeur de ut_1 était anciennement 64; l'accroissement qu'elle a subi résulte du plus grand nombre de vibrations attribué au diapason.

223. **Longueur des ondes.** — Lorsqu'on connaît le nombre de vibrations que fait un corps sonore par seconde, il est facile d'en déduire la longueur des ondes. On sait, en effet, qu'à 10 degrés, le son parcourt 337 mètres par seconde; par conséquent, si un corps ne faisait qu'une vibration double par seconde, la longueur d'onde serait de 337 mètres; s'il en faisait deux, la longueur d'onde serait la moitié de 337 mètres; s'il en faisait trois, le tiers; et ainsi de suite. C'est-à-dire que *la longueur d'onde est le quotient de la vitesse du son divisée par le nombre de vibrations complètes;* et cela, quelle que soit la hauteur du son, puisque la vitesse est la même pour les sons graves ou aigus (201).

Si donc on représente la vitesse du son par v, la longueur d'onde par l, le nombre de vibrations par seconde par n, on aura $v = ln$; formule d'où l'on tire $n = \frac{v}{l}$: ce qui fait voir que le nombre des vibrations est en raison inverse de la longueur d'onde.

VIBRATIONS DES CORDES.

224. **Vibrations des cordes.** — On nomme *cordes*, en acoustique, des corps filiformes, généralement de métal ou de boyau, élastiques par tension.

On distingue, dans les cordes, deux sortes de vibrations, les

unes *transversales,* ou dans une direction perpendiculaire aux cordes; les autres *longitudinales*, ou dans le sens de leur longueur. On excite les premières avec un archet, comme sur le violon, ou en pinçant les cordes, comme on le fait sur la harpe et la guitare. Quant aux vibrations longitudinales, on les fait naître en frottant les cordes dans le sens de leur longueur, avec un morceau d'étoffe saupoudré de colophane.

225. **Sonomètre.** — Le *sonomètre* est un appareil qui sert à étudier les vibrations transversales des cordes. On l'appelle aussi

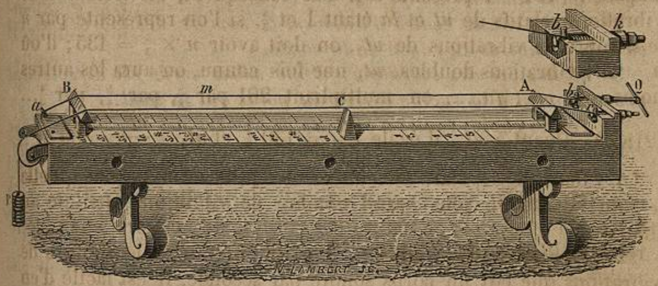


Fig. 149.

monocorde, parce que souvent il ne porte qu'une seule corde. Cet appareil se compose d'une caisse de bois mince, destinée à renforcer le son; sur cette caisse sont deux chevalets fixes A et B (fig. 149), distants l'un de l'autre d'un mètre. D'un chevalet à l'autre est une échelle divisée en millimètres, et à droite et à gauche de cette échelle sont tracées sur la caisse deux séries de divisions, marquant, l'une la gamme vraie ou diatonique (219), l'autre la gamme *tempérée*, c'est-à-dire une gamme dans laquelle l'octave est partagée en douze intervalles rigoureusement égaux, qu'on nomme *demi-tons moyens*. Sur les chevalets passent deux cordes : l'une, m, s'enroule d'un bout sur un boulon de fer a, qui est fixe; et de l'autre bout sur un boulon b, qui est lié à une vis horizontale, qu'on recule plus ou moins en faisant tourner un écrou k dans lequel passe la vis, de manière à tendre la corde à volonté. La deuxième corde n, fixée de la même manière à son extrémité r, passe à son autre extrémité sur une poulie. Là elle est tendue par des poids P, de plomb, qu'on augmente jusqu'à ce que la corde ait pris la tension voulue. Enfin, un chevalet mobile C peut se déplacer sous la corde pour en faire varier la longueur.

La première corde m est à son fixe; c'est-à-dire qu'on la tend jusqu'à lui faire rendre un son donné, auquel on compare ensuite les sons rendus par la corde n, à mesure qu'on la tend ou qu'on la raccourcit davantage. Ou bien les deux cordes passent chacune sur une poulie, et alors elles sont tendues par des poids égaux ou dans un rapport donné.

226. **Lois des vibrations transversales des cordes.** — Le calcul et l'expérience font voir que les vibrations transversales des cordes sont soumises aux lois suivantes :

1° *La tension d'une corde étant constante, le nombre des vibrations, dans le même temps, est en raison inverse de la longueur.*

2° *Toutes choses égales d'ailleurs, le nombre des vibrations est en raison inverse du rayon de la corde.*

3° *Le nombre des vibrations d'une même corde est directement proportionnel à la racine carrée du poids qui la tend.*

4° *Toutes choses égales d'ailleurs, le nombre des vibrations d'une corde est inversement proportionnel à la racine carrée de sa densité.*

En musique, ces lois trouvent leur application dans les instruments à cordes, dans lesquels on fait varier la longueur, le diamètre, la tension et la nature des cordes, de manière à leur faire rendre telle ou telle note.

Ces lois sont comprises dans la formule $n=\frac{1}{rl}\sqrt{\frac{P}{\pi d}}$, dans laquelle n représente le nombre de vibrations simples par seconde, l la *longueur* de la corde, c'est-à-dire la partie vibrante comprise entre les deux chevalets A et B (fig. 149), r le rayon de la section de la corde, P le poids qui la tend, et enfin d la densité de la corde, c'est-à-dire la masse sous l'unité de volume (40) ; quant à π, c'est le rapport de la circonférence au diamètre, lequel, comme on sait, est constant et égal à 3,141592....

Dans cette formule P est compté en kilogrammes, l et r en décimètres.

Remarque sur la formule des vibrations des cordes. — On donne à la formule sur les vibrations transversales des cordes, tantôt la forme $n=\frac{1}{rl}\sqrt{\frac{P}{\pi d}}$ [1] ci-dessus, tantôt la forme $n=\frac{1}{rl}\sqrt{\frac{gP}{\pi d}}$ [2]. Cette différence provient de ce que, dans la formule [2], d représente le poids spécifique de la corde, c'est-à-dire sa densité relative (41), tandis que, dans la formule [1], la même lettre représente la densité absolue. En effet, Lagrange a donné la formule des vibrations transversales des cordes sous la forme $n=\sqrt{\frac{gP}{lp}}$ [3], dans laquelle n, P et l ayant la même signification que ci-dessus, g représente l'intensité de la pesanteur (57), et p le poids de la partie vibrante de la corde. Or, d'après la formule connue $P=VD$ (106), on a $p=\pi r^2 ld$, d étant le poids spécifique de la corde, et $\pi r^2 l^2$ son volume, puisqu'elle n'est autre chose qu'un cylindre de rayon r et de hauteur l ; portant cette valeur de p dans la formule de Lagrange, on trouve

$$n=\sqrt{\frac{gP}{\pi r^2 l^2 d}}=\frac{1}{rl}\sqrt{\frac{gP}{\pi d}}.$$

Au contraire, si l'on représente par d la densité absolue de la corde, on aura, d'après la formule $P=VDg$ (41), $p=\pi r^2 lgd$; et portant encore cette valeur dans la formule de Lagrange, il vient $n=\frac{1}{rl}\sqrt{\frac{P}{\pi d}}$, formule qui est celle que nous avons donnée ci-dessus.

Tant que l'on ne considérera que des nombres relatifs de vibrations, il sera plus simple de faire usage de la formule [1] ; mais si l'on veut calculer le nombre absolu de vibrations que fait la corde par seconde, on devra avoir recours à la formule [2], en ayant soin de compter g en décimètres.

227. **Vérification expérimentale des lois des vibrations transversales des cordes.** — *Loi des longueurs.* — Pour vérifier cette loi, rappelons que les nombres relatifs de vibrations des notes de la gamme sont

ut	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*ut.*
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2 .

Cela posé, si l'on fait vibrer la corde du sonomètre d'abord dans son entier, puis ensuite en lui donnant, à l'aide du chevalet mobile, les longueurs $\frac{8}{9}$, $\frac{4}{5}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{5}$, $\frac{8}{15}$ et $\frac{1}{2}$, inverses des nombres ci-dessus, on obtient successivement toutes les notes de la gamme, ce qui prouve bien la première loi.

Loi des rayons. — On vérifie cette loi en tendant également sur le sonomètre deux cordes de même substance, dont les diamètres soient, par exemple, 3 et 2. Or, en les faisant vibrer, la deuxième donne la quinte de la première ; ce qui fait voir qu'elle fait 3 vibrations pendant que la première en fait 2.

Loi des tensions. — Ayant placé sur le sonomètre deux cordes identiques, on les tend par des poids qui soient entre eux comme 4 et 9. Or, la deuxième donne encore la quinte de la première ; d'où l'on conclut que leurs nombres de vibrations sont entre eux comme 2 et 3 ; c'est-à-dire comme les racines carrées des tensions. Si les deux poids étaient entre eux comme 16 et 25, on obtiendrait la tierce majeure, ou $\frac{5}{4}$.

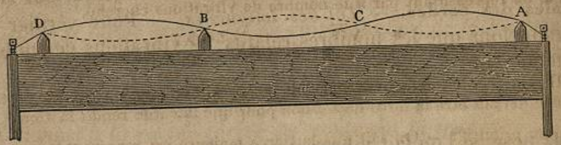
Loi des densités. — On fixe sur le sonomètre deux cordes de même rayon, mais de densités différentes. Leur ayant donné la même tension, on promène sous la plus dense le chevalet mobile jusqu'à ce qu'elle soit à l'unisson avec l'autre corde. d, d' étant alors les densités des deux cordes, et l, l' les longueurs qui vibrent à l'unisson, on trouve $\frac{l}{l'}=\frac{\sqrt{d}}{\sqrt{d'}}$. Or, comme, d'après la première loi, on sait que $\frac{l}{l'}=\frac{n'}{n}$, on a $\frac{n'}{n}=\frac{\sqrt{d}}{\sqrt{d'}}$; égalité qui vérifie la loi.

228. **Nœuds et lignes nodales, sons harmoniques des cordes.** — Lorsqu'un corps vibre, non-seulement il vibre dans son en-

semble, mais il se divise généralement en un certain nombre de parties aliquotes dont chacune est animée de vibrations qui lui sont propres.

Entre ces diverses parties, il existe des points et des lignes sensiblement fixes. Ce sont ces points et ces lignes qu'on désigne sous les noms de *nœuds* et de *lignes nodales*. Les parties vibrantes comprises entre deux nœuds ou deux lignes nodales se nomment

Fig. 150.



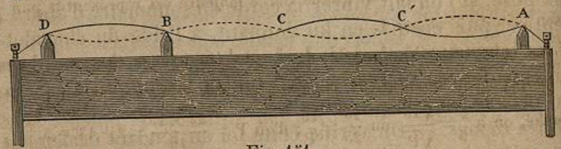


Fig. 151.

concamérations. Le milieu d'une concamération, là où les vibrations atteignent leur maximum d'amplitude, est un *ventre*.

Les cordes vibrantes présentent des exemples curieux de nœuds et de ventres, quand on ne fait vibrer qu'une partie aliquote de leur longueur, c'est-à-dire un tiers, un quart, un cinquième. Pour cela, on fixe la corde à ses deux bouts, et l'on fait glisser dessous un petit chevalet, en l'arrêtant successivement au tiers, au quart, au cinquième de la corde. Le chevalet étant au tiers, comme le représente la figure 150, on fait vibrer la portion BD avec un archet; l'autre portion AB se subdivise alors en deux parties AC et CB, qui vibrent séparément, le point C demeurant fixe. Cela se constate en plaçant de petits chevrons de papier, l'un en C, un autre entre B et C, un troisième entre C et A. Celui qui est en C n'éprouve qu'un léger ébranlement, tandis que les deux autres sont projetés au loin. Il y a donc un nœud dans le premier point, et des ventres dans les deux autres. Si le chevalet B est au quart de la corde, il se produit, entre A et B, deux nœuds et trois ventres (fig. 151); s'il est au cinquième, il se forme, entre les mêmes points, trois nœuds et quatre ventres, et ainsi de suite.

Lorsqu'une corde un peu longue vibre dans son entier, une oreille exercée distingue très-bien, outre le son fondamental, les *harmoniques* 2, 3, 4, 5; c'est-à-dire l'octave aiguë du son fon-

damental, la quinte de l'octave, la double octave et la tierce majeure (216).

Le même phénomène se reproduit dans tous les corps vibrants, ainsi qu'on le verra bientôt dans les tuyaux sonores (234).

229. **Problèmes sur les vibrations transversales des cordes.** — I. Une corde métallique fait 500 vibrations par seconde, sous la tension de 25 kilogrammes, combien en ferait-elle sous une tension de 49 kilogrammes?

Toutes choses égales d'ailleurs, les nombres de vibrations étant directement proportionnels aux racines carrées des poids qui tendent la corde (3e *loi*, 226), on a, en représentant par n le nombre de vibrations cherché,

$$\frac{n}{500}=\frac{\sqrt{49}}{\sqrt{25}}, \quad \text{d'où } n=\frac{500\times 7}{5}=700.$$

II. Une corde tendue par un poids de 15 kilogrammes rend un certain son; quelle devrait être la force de tension pour que la corde rendît la tierce majeure du son primitif? — On sait que la tierce majeure est représentée par $\frac{5}{4}$ quand le son primitif l'est par 1.

Les nombres de vibrations des deux sons étant entre eux comme 1 est à $\frac{5}{4}$, ou, ce qui est la même chose, comme 4 est à 5, si l'on représente par P le poids cherché, on a $\frac{4}{5}=\frac{\sqrt{15}}{\sqrt{P}}$, ou $\frac{16}{25}=\frac{15}{P}$; d'où $P=\frac{25\times 15}{16}=23^{k},437^{gr},5$.

III. Une corde de platine de $0^{mill},8$ de diamètre et une corde de fer de $1^{mill},3$ étant tendues par des poids égaux, quelles doivent être leurs longueurs relatives pour qu'elles rendent deux sons à l'unisson? — On sait que le poids spécifique de platine est 23, et celui du fer 7,78.

Représentons par R, L, D, le rayon, la longueur et la densité de la corde de platine; par r, l, d, les mêmes quantités pour la corde de fer; et par P le poids qui les tend.

Les nombres de vibrations étant égaux, on a, d'après la formule $n=\frac{1}{rl}\sqrt{\frac{P}{\pi d}}$,

$$\frac{1}{RL}\sqrt{\frac{P}{\pi D}}=\frac{1}{rl}\sqrt{\frac{P}{\pi d}},$$

ou, en supprimant les facteurs communs,

$$\frac{1}{RL}\cdot\frac{1}{\sqrt{D}}=\frac{1}{rl}\cdot\frac{1}{\sqrt{d}}, \quad \text{d'où } \frac{L}{l}=\frac{r}{R}\sqrt{\frac{d}{D}}.$$

Si l'on prend $l=1$, il vient $L=\frac{r}{R}\sqrt{\frac{d}{D}}=\frac{6,5}{4}\cdot\sqrt{\frac{7,78}{23}}=0,945$.

Les deux longueurs relatives sont donc 1 et 0,945.

IV. Calculer, à l'aide du sonomètre, le nombre de vibrations correspondant à un son donné.

Supposant que la corde du sonomètre rende un son moindre que le la_3 du diapason (221), on la raccourcit, au moyen du chevalet mobile, jusqu'à ce qu'elle rende cette note, c'est-à-dire jusqu'à ce qu'elle fasse 870 vibrations simples par seconde. On mesure la longueur l de la partie vibrante; puis, avançant ou reculant le chevalet, on cherche la longueur que doit avoir la corde pour être à l'unisson du son donné. l' étant cette longueur, et n le nombre de vibrations correspondant, c'est-à-dire le nombre cherché, on a, d'après la loi des longueurs,

$$\frac{n}{870}=\frac{l}{l'},\ \text{d'où}\ n=\frac{870\,l}{l'}.$$

*230. **Vibrations longitudinales des cordes.** — On a déjà vu que pour déterminer dans une corde tendue des vibrations longitudinales, on la frotte dans le sens de sa longueur avec un morceau de drap saupoudré de colophane (224).

On trouve par le calcul que les lois des vibrations longitudinales des cordes sont données par la formule $n=\frac{1}{rl}\sqrt{\frac{gQ}{\pi d}}$, n, r, l, g et d ayant la même signification que dans la formule des vibrations transversales, et Q étant le *coefficient d'élasticité* de la corde. On désigne sous ce nom *le poids qui serait nécessaire pour donner à la corde une tension telle, qu'elle s'allongeât d'une quantité égale à elle-même;* allongement qui ne peut jamais se réaliser, la rupture ayant lieu bien auparavant.

De la formule ci-dessus on déduit quatre lois identiques avec celles déjà données pour les vibrations transversales.

CHAPITRE IV.

VIBRATION DE L'AIR DANS LES TUYAUX SONORES.

231. **Tuyaux sonores.** — On nomme *tuyaux sonores*, des tubes creux dans lesquels on produit des sons en faisant vibrer la colonne d'air qui y est renfermée. Dans les divers appareils décrits jusqu'ici, le son résulte des vibrations de corps solides; l'air n'en est que le véhicule. Dans les instruments à vent, lorsque les tuyaux ont leurs parois suffisamment résistantes, c'est la colonne d'air renfermée dans les tuyaux qui seule est le corps sonore. On constate, en effet, que la matière des tuyaux est sans influence sur le son; il est le même, à dimensions égales, que les tuyaux soient de bois, de cristal ou de métal. Le timbre seul est modifié.

Si l'on ne faisait que souffler dans les tuyaux, il n'y aurait pas de son, mais seulement un mouvement progressif continu de l'air. Pour qu'un son se produise, il faut, par un moyen quelconque, exciter dans l'air une succession rapide de condensations et de raréfactions, qui se propagent ensuite à toute la colonne d'air contenue dans le tuyau. De là, la nécessité de donner à l'*embouchure*, c'est-à-dire à l'extrémité du tuyau par laquelle arrive l'air, une forme convenable pour que celui-ci ne puisse entrer que par intermittences, et non d'une manière continue. D'après la disposition adoptée pour mettre ainsi l'air en vibration, les tuyaux sonores se divisent en *tuyaux à bouche* et en *tuyaux à anche.*

232. **Tuyaux à bouche.** — Dans les tuyaux à bouche toutes les

parties de l'embouchure sont fixes. Ces tuyaux sont de bois ou de métal, prismatiques ou cylindriques, et toujours d'une grande longueur par rapport à leur diamètre. La figure 152 représente un tuyau à bouche, et la figure 153 en montre une coupe longitudinale, qui permet de voir les détails intérieurs. Dans ce tuyau, la partie inférieure P, par laquelle arrive l'air, se nomme le *pied;*

Fig. 152.

Fig. 153.

Fig. 154.

Fig. 155.

Fig. 156.

il sert à fixer le tuyau sur une soufflerie (*fig.* 157). A sa sortie du pied, l'air passe dans une fente étroite *i*, qu'on appelle la *lumière.* En regard de celle-ci est pratiquée, dans la paroi opposée, une ouverture transversale qui est la *bouche;* son bord *a*, taillé en biseau, est la *lèvre supérieure*, et le bord *b*, la *lèvre inférieure.*

Cela posé, le courant d'air qui passe par la lumière se brise contre le biseau de la lèvre supérieure, s'y comprime, et, par un effet d'élasticité, réagit sur le courant qui continue d'arriver et l'arrête; mais cet arrêt n'a lieu que pendant un intervalle de temps très-court, parce que l'air s'échappant par la bouche, le courant