CHAPITRE II

HAUTEUR DES SONS. — INTERVALLES MUSICAUX.

I. — APPAREILS DESTINÉS A COMPTER LES VIBRATIONS.

647. **Sirène.**— Nous avons vu déjà (630) qu'un corps sonore, comme une lame élastique ou une corde tendue, donne un son dont la *hauteur musicale* est d'autant plus grande qu'il se produit un plus grand nombre de vibrations dans un même temps. — C'est ce que nous allons vérifier maintenant d'une manière plus précise, au moyen d'appareils qui permettent de *compter* les vibrations effectuées en un temps déterminé. — L'un des premiers appareils qui aient été imaginés pour cet objet est la sirène, dont l'invention est due à Cagniard de Latour.

La *sirène* (*fig.* 540) se compose d'une petite caisse cylindrique HH, dont le fond porte un tube F qui permet de l'adapter sur une soufflerie. La face supérieure de cette caisse est formée par une plaque AA (*fig.* 541), qui est percée d'un certain nombre de trous tels que *a*, distribués sur une circonférence, à égale distance les uns des autres : c'est par ces trous que s'échappera l'air amené dans la caisse par la soufflerie. Au-dessus, et à une très petite distance, se trouve un plateau BB, mobile autour d'un axe vertical D : il est également percé de trous tels que *b*, en même nombre que ceux de la caisse, et distribués exactement de la même manière, en sorte que, lorsqu'un trou du plateau mobile se trouvera en face de l'un des trous de la plaque fixe, tous les autres trous se correspondront en même temps. — Ajoutons enfin que les trous *a* de la plaque fixe sont inclinés dans un certain sens, et les trous *b* du plateau mobile sont inclinés en sens contraire, comme le montre la figure 541; dès lors, quand les trous se correspondent, l'air qui sort par les trous inférieurs vient frapper contre les parois des trous supérieurs, et, en s'échappant dans l'atmosphère, il communique une impulsion au pla-

teau mobile, dans le sens de la flèche *c*. Ce mouvement du plateau B détruit la coïncidence des deux systèmes de trous, et fait cesser l'échappement de l'air; mais une nouvelle coïncidence se produit, dès que le

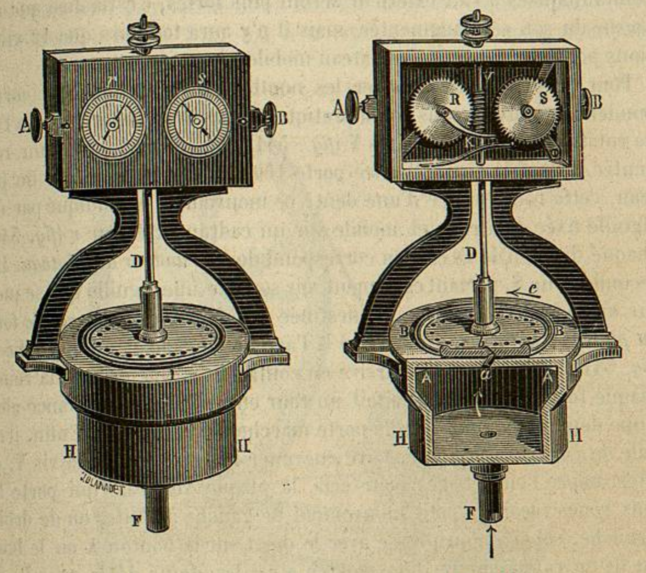

Fig. 540. Sirène. Fig. 541.

plateau A a tourné d'un angle égal à celui qui correspond à l'intervalle de deux trous consécutifs : l'air, en s'échappant de nouveau, communique une nouvelle impulsion au plateau mobile, en sorte que le mouvement de rotation devient de plus en plus rapide, et les périodes d'échappement de l'air deviennent de plus en plus fréquentes.

Lorsque le plateau B a acquis une vitesse suffisante, l'oreille commence à percevoir un son, dont la hauteur musicale s'élève à mesure que la vitesse augmente. — Pour nous rendre compte des caractères de ce son, considérons, par exemple, une sirène dont la plaque fixe présente 12 trous, et examinons d'abord quel serait l'effet produit *si le plateau mobile n'en avait qu'un seul*. A chaque tour du plateau, ce trou unique viendrait se mettre successivement en coïncidence avec les 12 trous de la plaque fixe : la sortie de l'air serait donc 12 fois établie et interrompue, mais ne s'effectuerait toujours que par une seule ouverture. La succession des impulsions communiquées à l'air extérieur donnerait naissance à un son, dont la *hauteur musicale* dépendrait de la vitesse de rotation du plateau mobile. — Si maintenant le plateau mobile porte 11 autres trous, on voit que, au moment où le trou primitivement considéré établira une coïncidence, tous les autres trous correspondront aussi à des ouvertures de la plaque fixe. Dès lors, la sortie de l'air s'effectuant par les 12 ouvertures à la fois, les impulsions communiquées à l'air extérieur seront plus fortes, c'est-à-dire que *l'intensité* du son sera augmentée, mais il n'y aura toujours que 12 vibrations pour chaque tour du plateau mobile.

Pour permettre de compter les nombres de vibrations qui correspondent aux divers sons, on a pratiqué, à la partie supérieure de l'axe de rotation D, un filet de vis V (*fig*. 541), qui engrène avec une roue dentée R dont la circonférence porte 100 dents. A chaque tour du plateau, cette roue avance d'une dent : ce mouvement est indiqué par une aiguille fixée à la roue et mobile sur un cadran extérieur *r* (*fig*. 540) : chaque division de ce cadran correspond donc à *un tour du plateau*. Une seconde roue S, portant également sur son axe une aiguille qui se meut sur un cadran extérieur *s*, est destinée à compter les *centaines de tours du plateau* : pour cela, on a fixé à l'axe de la roue R un appendice K (*fig*. 541), dont l'extrémité arrive en contact avec une dent de la roue S chaque fois que la roue R a fait un tour entier ; la roue S avance alors d'une dent, et l'aiguille qu'elle porte marche d'une division. Enfin, il est utile de pouvoir, à volonté, faire engrener la roue R avec la vis V, ou interrompre l'engrenage : pour cela, la plaque verticale qui porte les deux roues reçoit un petit mouvement de gauche à droite, ou de droite à gauche, selon qu'on presse avec le doigt sur le bouton A ou le bouton B ; on rapproche ou l'on éloigne ainsi les dents de la roue R, du filet de la vis V.

Lorsqu'on veut compter le nombre de vibrations d'un son quelconque, on place la sirène sur la soufflerie, les deux aiguilles étant aux zéros de leurs cadrans, et l'engrenage n'étant pas établi. On donne le vent, et l'on amène progressivement le son de la sirène à la même hauteur que celui qu'on se propose d'étudier ; on presse alors sur le bouton A, pour établir l'engrenage, et l'on note cet instant sur une montre à secondes. On maintient l'unisson aussi longtemps que possible, en réglant le vent de la soufflerie ; enfin, on termine l'expérience en poussant le bouton B, et notant encore cet instant. On connaît ainsi le nombre de tours effectués par le plateau en un temps déterminé. — Supposons, par exemple, que l'expérience ait duré 45 secondes ; que l'aiguille des centaines de tours soit arrivée à la 22e division, et l'aiguille des tours à la 35e division. Le plateau aura fait 2235 tours ; si ce plateau porte 12 trous, il se sera produit un nombre de vibrations égal à 2235×12, ou 26 820. Le nombre de vibrations *en une seconde* sera le quotient de 26 820 par 45, ou 596 (*).

(*) Il est important de remarquer que l'aiguille des tours n'avance d'une division qu'après chaque tour *entier* du plateau, c'est-à-dire après un nombre de vibrations égal au nombre des trous. Le plateau ayant 12 trous, on voit que le nombre des vibrations effectuées pendant *la durée totale* de l'expérience ne pourra être déterminé qu'à 12 unités près. On atténue l'erreur qui en résulte, sur le nombre des vibrations effectuées *en une seconde*, en prolongeant l'expérience aussi longtemps que possible. — La seule difficulté consiste à maintenir le son constant pendant un grand nombre de secondes, ce à quoi l'on arrive en donnant le vent, non pas d'une manière continue, mais par intermittences.

648. **Roues dentées.** — Les *roues dentées* ont été imaginées par Savart, pour servir également à la mesure des nombres de vibrations qui correspondent à des sons déterminés.

Ces roues sont généralement au nombre de trois ou quatre, fixées sur un axe horizontal (*fig*. 542) ; on leur communique un mouvement de rotation rapide au moyen d'une courroie sans fin ACDB, qui passe sur un volant AB muni d'une manivelle M. Un compteur, semblable à celui de la sirène, fait connaître le nombre de tours effectués par les roues dentées dans un temps donné. — On place une carte sur le support S, de manière que, pendant la rotation, la tranche de cette carte soit rencontrée successivement par les dents de l'une des roues. Les chocs successifs déterminent dans l'air un mouvement vibratoire : le son

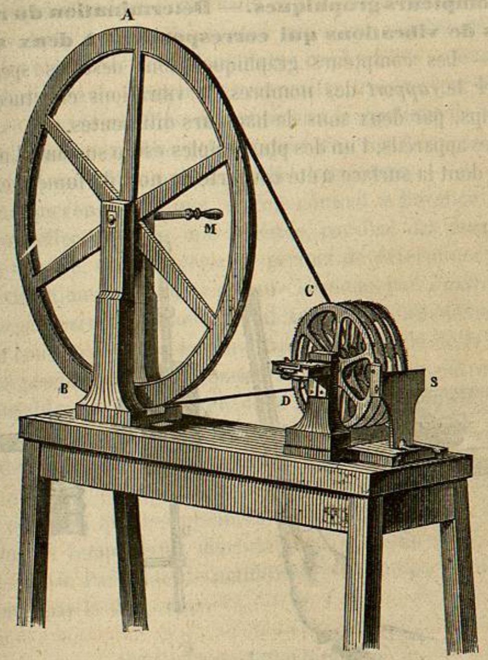

Fig. 542. — Roues dentées.

produit est d'autant plus aigu que le mouvement de rotation est plus rapide.

Pour déterminer le nombre des vibrations effectuées en une seconde, par un son de hauteur déterminée, on règle le mouvement de rotation de manière que ce son se maintienne pendant quelque temps, et l'on opère exactement comme avec la sirène.

649. **Compteurs graphiques. — Détermination du rapport des nombres de vibrations qui correspondent à deux sons déterminés.** — Les compteurs graphiques sont destinés spécialement à déterminer le *rapport* des nombres de vibrations effectuées, dans un même temps, par deux sons de hauteurs différentes.

Parmi ces appareils, l'un des plus simples est le suivant. Un cylindre EF (*fig.* 543), dont la surface a été couverte de noir de fumée, est porté sur

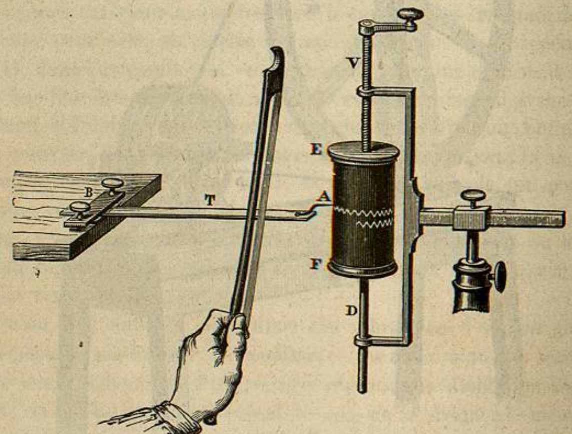

Fig. 543. — Compteur graphique.

un axe DV, dont la partie supérieure V, travaillée en filet de vis, s'engage dans un écrou pratiqué dans l'une des branches du support. Lorsqu'on fait tourner le cylindre au moyen de la manivelle M, il s'abaisse, à chaque tour, d'une quantité égale au pas de la vis. — La figure représente en T une tige métallique, qui est assujettie solidement par l'une de ses extrémités B, et dont l'autre extrémité porte une pointe fine A; cette pointe vient toucher légèrement la surface du cylindre. Si l'on faisait mouvoir le cylindre seul, la pointe, enlevant le noir de fumée, tracerait une hélice; si, en même temps, on fait vibrer la tige au moyen d'un archet, l'hélice parait dentelée : chacune des sinuosités correspond à une vibration de la tige.

Disposons maintenant, l'un au-dessous de l'autre, deux corps sonores, de manière qu'ils inscrivent en même temps leurs vibrations sur la surface du cylindre, et supposons d'abord que ces deux corps produisent des sons *de même hauteur*. Si, une fois l'expérience faite, on trace sur le noir de fumée deux lignes verticales, à une certaine distance l'une de l'autre, on trouve que les deux courbes présentent un même nombre de sinuosités dans l'intervalle de ses deux lignes. On en conclut que les deux corps ont effectué *un même nombre de vibrations* dans le même temps. — Si les deux corps rendent des sons *de hauteurs différentes*, il suffira de compter les sinuosités tracées, par l'un et par l'autre, entre deux verticales déterminées : le quotient de l'un de ces nombres par l'autre exprimera le *rapport* des nombres de vibrations effectuées, dans un même temps, par les deux corps.

Nous remarquerons enfin que, si l'on connait à l'avance le nombre des vibrations effectuées, en une seconde, par *l'un des deux corps* sur lesquels on a opéré, cette expérience permet de déterminer le nombre *absolu* des vibrations effectuées en une seconde par *l'autre corps.* — Supposons, par exemple, que l'on ait inscrit simultanément, sur le cylindre, la courbe produite par une tige comme celle de la figure 543, et la courbe produite par un diapason; supposons, en outre, qu'on ait trouvé préalablement, au moyen de la sirène par exemple, que le son du diapason correspond à 435 vibrations par seconde. Si, entre deux verticales déterminées, on trouve que la courbe tracée par la tige présente 20 sinuosités, et que la courbe tracée par le diapason en présente 25, on en conclura que les nombres de vibrations de ces deux corps, dans un même temps, sont dans le rapport de 20 à 25, ou dans le rapport de 4 à 5. Par suite, le nombre de vibrations, en une seconde, du son rendu par la tige, sera

$$425 \times \frac{4}{5}, \text{ ou } 340 \text{ vibrations.}$$

650. **Limites des sons perceptibles à l'oreille.** — Il ne suffit pas qu'il se produise un mouvement vibratoire, pour que notre oreille perçoive un son. Il faut encore que ce mouvement ne soit ni trop lent, ni trop rapide.

A mesure que les vibrations deviennent *plus lentes*, le son devient *plus grave*. Mais, si les vibrations sont trop lentes, l'observation montre qu'elles cessent de produire sur l'oreille la sensation d'un son : on n'entend plus qu'une sorte de ronflement, sans caractère musical. — D'après les expériences de M. Helmholtz, il faut qu'un mouvement vibratoire comprenne au moins 20 *vibrations par seconde*, pour que l'oreille perçoive un véritable son.

Inversement, à mesure que les vibrations deviennent *plus rapides*, le son devient *plus aigu*. Mais, si les vibrations sont trop rapides, elles ne produisent plus sur l'oreille qu'une sensation désagréable, parfois même presque douloureuse; enfin, pour une rapidité plus grande encore, l'oreille cesse de percevoir aucun son. — D'après les expériences de M. Kœnig, les nombres de vibrations des sons perceptibles à l'oreille ne dépassent pas 23 000 *par seconde*.

Ces limites, soit pour les sons graves, soit pour les sons aigus, sont d'ailleurs assez variables d'une personne à une autre. C'est ainsi par exemple que, d'après une observation ancienne de Wollaston, il est des personnes pour lesquelles le son perçant produit par le grillon est impossible à entendre.

II. — INTERVALLES MUSICAUX. — GAMME.

651. **Intervalle de deux sons.** — Nous avons vu que l'égalité de hauteur de deux sons, ou l'*unisson*, est caractérisée par l'égalité entre les nombres de vibrations produites, pour chacun d'eux, dans le même temps. — On appelle, en Acoustique, *intervalle de deux sons, le rapport des nombres de vibrations qui leur correspondent, pendant des temps égaux*. Si, par exemple, deux sons correspondent, l'un à 900 vibrations par seconde, l'autre à 600, l'intervalle de ces deux sons est $\frac{3}{2}$.

On dit qu'un son est à l'*octave aiguë* d'un autre, lorsqu'il correspond à un nombre de vibrations *double*, dans le même temps. L'intervalle de ces deux sons est égal à 2.

Le plus ordinairement, l'intervalle de deux sons musicaux n'est pas représenté par un nombre entier; mais, si l'on ramène la valeur numérique de cet intervalle à une expression fractionnaire irréductible, les deux termes de cette expression sont généralement des nombres d'autant plus simples, que la consonance formée par la production *simultanée* des deux sons est plus agréable à l'oreille. — C'est ce que nous allons constater par l'étude des principaux intervalles usités en musique.

652. **Gamme.** — On donne le nom de *gamme* à une série de huit sons ou *notes*, dont les deux extrêmes sont à un intervalle d'une octave, et dont les notes intermédiaires sont à des intervalles particuliers, toujours les mêmes pour les diverses gammes. — Les notes de la *gamme d'ut* sont désignées par ut_1, *ré*, *mi*, *fa*, *sol*, *la*, *si*, ut_2. — La première note de la gamme est ce qu'on nomme la *tonique*.

Pour obtenir les valeurs des divers intervalles que présente la gamme d'*ut*, supposons que l'on ait d'abord déterminé, au moyen de la sirène par exemple, les nombres de vibrations effectuées en une seconde par chacune des notes. Une fois ces nombres obtenus, on les a employés à calculer l'intervalle musical qui existe *entre chacune des notes et la*

tonique, c'est-à-dire le rapport du nombre de vibrations de chaque note, au nombre de vibrations de la tonique. — On a trouvé, pour ces rapports, réduits à leur plus simple expression, les résultats suivants :

ut_1	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	ut_2
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2.

653. **Accord parfait.** — De ces divers rapports, le plus simple est le rapport $\frac{3}{2}$, qui exprime l'intervalle musical entre la cinquième note de la gamme et la tonique; on l'appelle *intervalle de quinte* (*ut* à *sol*). C'est aussi l'intervalle dont l'oreille apprécie le mieux la justesse, et c'est à lui que les musiciens ont recours pour accorder leurs instruments. Enfin, la production *simultanée* de la tonique *ut* et de la quinte *sol* produit une sensation particulièrement agréable. — Le rapport $\frac{5}{4}$, qui exprime l'intervalle entre la troisième note de la gamme et la tonique, ou *intervalle de tierce* (*ut* à *mi*), donne lieu à des remarques analogues. — La succession de la tonique, de la tierce et de la quinte (*ut*, *mi*, *sol*) constitue ce qu'on appelle un *accord parfait* (*).

654. **Intervalles des notes consécutives de la gamme.** — Servons-nous maintenant des résultats qui précèdent, pour calculer les intervalles successifs entre *deux notes consécutives* de la gamme d'*ut*. Il suffira, pour cela, de diviser chacune des expressions obtenues par

(*) La gamme tout entière peut être considérée comme dérivant de l'accord parfait ; nous allons montrer en effet que, si l'on prend comme point de départ la note *ut*, une succession de trois accords parfaits permet de retrouver toutes les notes de la gamme, avec les nombres des vibrations indiqués plus haut.

Et d'abord, l'accord parfait qui a pour tonique *ut* fournit les trois notes *ut*, *mi*, *sol*, dont les nombres de vibrations sont 1, $\frac{5}{4}$, $\frac{3}{2}$.

Si maintenant on forme un accord parfait dont la tonique soit la dernière note de l'accord d'*ut*, c'est-à-dire la note *sol*, on obtient, comme nombre de vibrations de la seconde note de ce nouvel accord, $\frac{3}{2}\times\frac{5}{4}=\frac{15}{8}$; c'est la note *si*. Quant à la troisième note de ce même accord, elle aura comme nombre de vibrations $\frac{3}{2}\times\frac{3}{2}=\frac{9}{4}$; il suffit d'en prendre la moitié, c'est-à-dire l'octave grave, pour obtenir le nombre $\frac{9}{8}$, qui correspond au *ré* de la gamme.

Enfin, si l'on forme un accord parfait dont la dernière note soit la note *ut*, on aura, pour la tonique de ce nouvel accord, le nombre de vibrations 1 divisé par $\frac{3}{2}$, c'est-à-dire $\frac{2}{3}$; il suffit d'en prendre le double, c'est-à-dire l'octave aiguë, pour obtenir le nombre $\frac{4}{3}$ qui correspond au *fa* de la gamme. Enfin on aura, pour la seconde note de ce même accord, le nombre $\frac{2}{3}\times\frac{5}{4}=\frac{5}{6}$, dont il suffit encore de prendre l'octave aiguë pour obtenir le nombre $\frac{5}{3}$, qui correspond au *la* de la gamme. — On retrouve donc ainsi toutes les notes de la gamme d'*ut*.

celle qui la précède immédiatement. — Ce calcul est indiqué dans le tableau suivant, avec les noms que les musiciens ont donnés à ces intervalles.

INTERVALLES DE DEUX NOTES CONSÉCUTIVES DE LA GAMME.

ut_1 à ré.........	$\frac{9}{8} : 1 = \frac{9}{8}$	.... ton majeur.
ré à mi.........	$\frac{5}{4} : \frac{9}{8} = \frac{10}{9}$	.... ton mineur.
mi à fa.........	$\frac{4}{3} : \frac{5}{4} = \frac{16}{15}$	.... demi-ton.
fa à sol.........	$\frac{3}{2} : \frac{4}{3} = \frac{9}{8}$	.... ton majeur.
sol à la.........	$\frac{5}{3} : \frac{3}{2} = \frac{10}{9}$	.... ton mineur.
la à si.........	$\frac{15}{8} : \frac{5}{3} = \frac{9}{8}$	.... ton majeur.
si à ut_2.........	$2 : \frac{15}{8} = \frac{16}{15}$	.... demi-ton.

Sans nous arrêter à la distinction entre les tons majeurs et les tons mineurs, nous dirons que les intervalles offerts par les notes consécutives de la gamme d'*ut* forment une série comprenant *deux tons, suivis d'un demi-ton*, et *trois tons, suivis d'un demi-ton* (*).

Après avoir formé une première gamme d'*ut*, commençant par ut_1 et finissant par ut_2, on peut en former une seconde, commençant par ut_2 et finissant par ut_3; chacune des notes de cette seconde gamme sera l'octave aiguë de la note correspondante de la première. On en formera de même une troisième, et ainsi de suite, ce qui donnera une échelle musicale, formée par une série de *gammes d'ut*, où les notes deviendront de plus en plus aiguës (**).

(*) L'expression $\frac{10}{9}$, qui représente le ton mineur, est très peu différente de l'expression $\frac{9}{8}$, qui représente le ton majeur, car le rapport de ces deux expressions est $\frac{80}{81}$. Il ne diffère donc de l'unité que de $\frac{1}{81}$; c'est un intervalle qui est difficilement appréciable à l'oreille, et qui a reçu le nom de *comma*.

(**) La sensation produite sur l'oreille par la *succession* de plusieurs notes dépend des *rapports* que présentent entre eux leurs nombres de vibrations, et non pas des *valeurs absolues* de chacun de ces nombres. — C'est ce que l'on constate, d'une manière très simple, pour l'accord parfait en particulier, au moyen de roues dentées (*fig.* 536.) Prenons trois roues dentées, montées sur le même axe, et choisies de manière que les nombres de dents de ces trois roues soient dans les rapports de 1 à $\frac{5}{4}$ et à $\frac{3}{2}$ (la première roue ayant, par exemple, 100 dents; la seconde, 125 dents; la troisième, 150 dents). Si on leur donne une vitesse de rotation uniforme, et qu'on présente successivement une carte à chacune d'elles, on constate que les trois notes

655. **Dièzes.** — On peut aussi se proposer de former d'autres gammes, ayant pour toniques des notes autres que *ut*. — Nous allons voir que, pour conserver, dans ces nouvelles gammes, les mêmes intervalles que dans la gamme d'*ut*, il est nécessaire de substituer, à certaines notes de l'échelle précédente, des notes un peu différentes, qui prendront le nom de *dièzes* ou de *bémols*.

En partant des notes fournies par les gammes d'*ut*, proposons-nous de former une *gamme de sol*, c'est-à-dire une gamme ayant pour tonique la note *sol*, qui était la quinte dans la gamme d'*ut*. — Si l'on conservait, dans cette nouvelle gamme, les notes précédemment obtenues, *sol, la, si, ut, ré, mi, fa,* sol_2, le sixième intervalle (*mi* à *fa*), qui doit être d'un ton ($\frac{9}{8}$), ne serait que d'un demi-ton ($\frac{16}{15}$); il est donc nécessaire de substituer, à la note *fa*, une note plus élevée. On emploie alors une note dont le nombre de vibrations s'obtient en multipliant celui de *fa* par $\frac{25}{24}$; cette nouvelle note prend le nom de *fa dièze*, et s'indique par *fa*♯. — En même temps, cette substitution rend le septième intervalle (*fa*♯ à sol_2) égal à un demi-ton, comme il doit être.

En partant maintenant des notes fournies par les gammes de *sol*, cherchons à former une *gamme de ré*, c'est-à-dire une gamme ayant pour tonique la note *ré*, qui était la quinte dans la note de *sol*. — Si l'on conservait les notes telles qu'on vient de les obtenir, *ré, mi, fa*♯, *sol, la, si, ut,* $ré_2$, le sixième intervalle ne serait encore que d'un demi-ton. En substituant à la note *ut* la note *ut*♯, on rend au sixième et au septième intervalle les valeurs qu'ils doivent avoir. — La gamme de *ré*, ainsi obtenue, comprend alors deux notes *diézées*; et ainsi de suite.

En général, *pour passer d'une gamme quelconque à celle qui aura sa tonique à une quinte au-dessus de celle de la première, il suffit de reproduire les notes fournies par celle-ci, en diézant l'avant-dernière note*, ou note sensible, *de la nouvelle gamme.*

656. **Bémols.** — Des considérations analogues conduisent à l'introduction des *bémols*. — Partons encore des notes fournies par les gammes d'*ut*, et proposons-nous de former une gamme ayant sa tonique à une quinte *au-dessous d'ut*, c'est-à-dire une *gamme de fa*. Avec les notes *fa, sol, la, si, ut, ré, mi,* fa_2, le troisième intervalle (*la* à *si*), qui devrait être d'un demi-ton, est d'un ton; le quatrième intervalle, qui est d'un ton, n'est que d'un demi-ton. On rendra à ces deux intervalles les valeurs qu'ils doivent avoir, en substituant à la note *si*, une note plus basse, dont on obtiendra le nombre de vibrations en multi-

obtenues forment un accord parfait. — Si l'on change la vitesse de rotation, et qu'on recommence l'expérience, on obtient trois nouvelles notes, ayant des hauteurs différentes des précédentes, mais formant encore un accord parfait. Or, dans ces expériences successives, les *valeurs absolues* des nombres de vibrations ont été modifiées, mais les *rapports* de ces nombres entre eux sont restés les mêmes.

pliant celui de *si* par $\frac{24}{25}$: cette nouvelle note prend le nom de *si bémol*, et s'indique par *si*♭.

En partant de même de cette gamme de *fa*, pour former une gamme ayant sa tonique à une quinte au-dessous de *fa*, c'est-à-dire une *gamme de si*♭, on sera conduit à substituer, à la note *mi*, une note plus basse, c'est-à-dire *mi bémol*. Cette nouvelle gamme contiendra alors deux notes *bémolisées;* et ainsi de suite.

En général, *pour passer d'une gamme à celle qui aura sa tonique à une quinte au-dessous de celle de la première, il suffit de reproduire les notes fournies par celle-ci, en bémolisant la quatrième note de la nouvelle gamme* (celle qui est à une quinte au-dessous de l'octave).

* 657. **Gamme tempérée.** — Par ce qui précède, on voit que, dans l'intervalle d'une seule octave, devraient se placer 21 sons différents, savoir : les sept notes de la gamme d'*ut*, leurs dièzes et leurs bémols. Si l'on voulait réaliser, dans plusieurs octaves successives, toutes ces notes sur des instruments à sons fixes, tels que l'orgue et le piano, on compliquerait à la fois la construction et le jeu de l'instrument. Cette considération a conduit les musiciens à l'idée du *tempérament*.

On divise l'intervalle d'octave en 12 demi-tons *moyens*, égaux entre eux, et constituant la succession des notes naturelles, avec leurs dièzes et leurs bémols (*). — Une note *diézée* se confond alors avec la note suivante *bémolisée* (ainsi, l'*ut dièze* se confond avec le *ré bémol;* le *ré dièze* se confond avec le *mi bémol*, etc.). — Les tons entiers, majeurs et mineurs, sont remplacés eux-mêmes par un intervalle décomposable en deux demi-tons moyens.

658. **Nombres absolus de vibrations, adoptés pour les diverses notes de l'échelle musicale.** — Jusqu'ici, nous n'avons considéré que les *rapports* des nombres de vibrations des diverses notes de l'échelle musicale ; dans la pratique, il est nécessaire, pour accorder entre eux les instruments, de fixer le nombre *absolu* des vibrations de l'une de ces notes, ce qui fixera en même temps les nombres de vibrations de toutes les autres.

D'après les conventions adoptées en France, l'*ut* le plus grave du violoncelle correspond à un nombre de vibrations, par seconde, représenté par 65,25. On le désigne par ut_1, et l'on affecte de l'indice 1 toutes les notes comprises entre ut_1 et son octave aiguë : dans l'octave suivante, les notes se distinguent par l'indice 2 ; dans la troisième octave, par l'indice 3, etc. Au-dessous de ut_1, on emploie, d'octave en octave, les indices — 1, — 2, etc.

(*) La valeur du *demi-ton moyen* est déterminée par cette condition, que, dans une octave, le produit de ces douze intervalles égaux doit être égal à 2. La valeur du demi-ton moyen est donc représentée par $\sqrt[12]{2}$ ou 1,060. — En comparant les notes ainsi obtenues avec celles que fournissaient les nombres précédents, il est facile de voir que les notes de la gamme tempérée n'en diffèrent que de quantités très petites

Pour accorder les instruments, on se sert d'un *diapason* (*fig.* 529), qui rend un son déterminé de l'échelle musicale. — Le diapason normal donne la note la_3, dont on a fixé la valeur à 435 vibrations par seconde (*).

659. **Étude optique des intervalles musicaux : expériences de Lissajous.** — On doit à Lissajous des expériences qui permettent de caractériser les intervalles musicaux sans le concours de l'oreille. — Dans une chambre obscure, par une ouverture étroite pratiquée au volet, on fait pénétrer un faisceau de rayons solaires. Ce faisceau vient rencontrer un petit miroir métallique *m* (*fig.* 544), fixé à

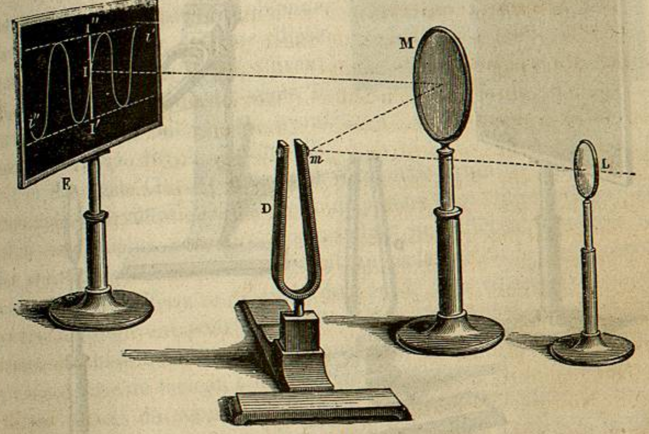

Fig. 544.

l'une des branches du diapason vertical D ; il est renvoyé par réflexion sur un miroir auxiliaire M, qui le réfléchit à son tour sur l'écran E. Au moyen d'une lentille L, on amène ces rayons à former sur l'écran une image très petite et très brillante. Nous supposerons cette image réduite à un point, et le faisceau lumineux réduit à un seul rayon.

Lorsqu'on fait vibrer le diapason à l'aide d'un archet, le miroir *m* exécute une série de vibrations, dont l'effet est de faire osciller le rayon réfléchi dans un plan vertical, et par suite, d'imprimer au point lumineux I un mouvement de va-et-vient sur l'écran, suivant sur une ligne droite I'I''. En raison de la persistance des impressions produites sur l'œil, on aperçoit alors la ligne I'I'' éclairée tout entière.

L'effet est tout autre quand on imprime, au miroir M, de petits mou-

(*) Ces vibrations sont des *vibrations doubles*, formées chacune d'une allée et d'une venue du corps sonore (629). Les auteurs qui entendent, par le mot de vibrations, des *vibrations simples*, formées chacune d'une allée ou d'une venue, donnent alors à la note *la*, un nombre de vibrations égal à 870 par seconde.

vements de rotation alternatifs autour de son axe vertical. L'image est alors animée de deux mouvements simultanés, savoir : un mouvement vibratoire vertical, et un mouvement de translation horizontal. La composition de ces deux mouvements donne une ligne sinueuse, telle que *i'Ii''* (*fig.* 544), dont chaque sinuosité correspond à une vibration du diapason.

Enlevons maintenant le miroir auxiliaire M, et mettons à la même place un deuxième diapason D' (*fig.* 545), installé de manière à vibrer

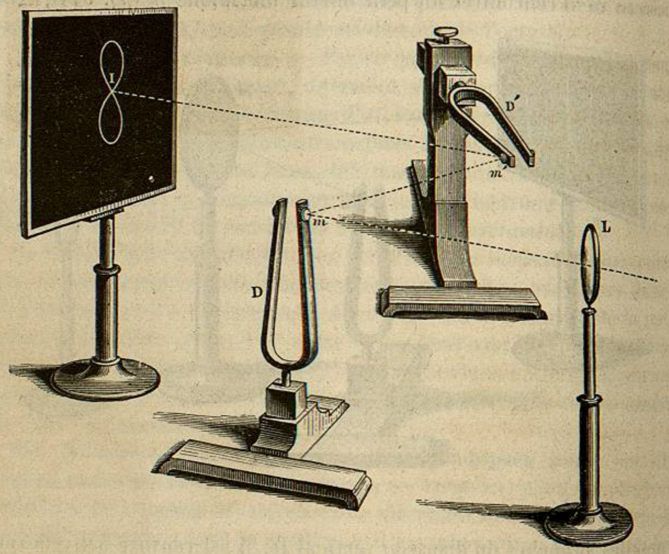

Fig. 545.

dans un plan horizontal, et portant, comme le premier, un petit miroir métallique *m'* sur l'une de ses branches. — Supposons d'abord que les deux diapasons soient rigoureusement à l'*unisson*. Soit I (*fig.* 546) la trace du rayon lumineux sur l'écran, lorsque les deux diapasons sont immobiles; I'I'', la droite verticale qu'elle décrirait, si le diapason D vibrait seul, et H'H la droite horizontale lumineuse qu'on obtiendrait en faisant vibrer le diapason D' seul. Admettons, pour plus de simplicité, que les *amplitudes* de vibrations des deux diapasons soient égales; I'I'' et H'H auront la même longueur. Admettons enfin que les deux mouvements commencent en même temps, ou, comme on dit, qu'il n'y ait entre eux aucune *différence de phase;* le point lumineux aura, à un instant quelconque, des vitesses égales parallèlement à I'I'' et parallèlement à H'H. Dès lors, le mouvement résultant

s'effectuera suivant la diagonale AB du carré dont I', H', I'', H sont les milieux des côtés.

Si, au contraire, le mouvement horizontal commence lorsque le point lumineux a déjà parcouru une partie de sa trajectoire verticale, c'est-à-dire quand le diapason vertical a déjà accompli une partie de sa vibration, la trajectoire résultante change. Selon que la *différence de phase* des deux mouvements est égale à $\frac{1}{8}$, $\frac{2}{8}$, $\frac{3}{8}$, $\frac{4}{8}$..., $\frac{8}{8}$ de vibration, le calcul montre que la courbe lumineuse obtenue sur l'écran doit être, soit une ellipse ayant son grand axe dirigé suivant AB, soit un cercle inscrit dans le carré ABCD, soit une ellipse ayant son grand axe dirigé suivant CD, soit la diagonale CD..., soit enfin la diagonale primitive AB. — Si les *amplitudes* de vibrations des deux diapasons sont différentes, ce qui est le cas le plus ordinaire, les résultats ne diffèrent que très peu des précédents ; le carré ABCD devient un rectangle, et le cercle correspondant à une différence de phase de $\frac{2}{8}$ ou de $\frac{6}{8}$ de vibration se change en une ellipse ayant pour axes I'I'' et H'H. On a alors, pour les différences de phase considérées, les figures optiques représentées dans la première série du tableau ci-contre (p. 606).

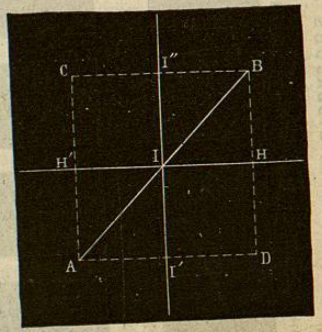

Fig. 546.

Nous venons de supposer l'unisson *rigoureusement* établi entre les deux diapasons : dans ce cas, à peu près impossible à réaliser, la différence de phase primitive se maintient aussi longtemps que durent les vibrations. La figure optique reste donc invariable de forme, et ne fait que diminuer de grandeur, à mesure que les amplitudes de vibrations décroissent. — Mais quand l'unisson semble établi pour l'oreille, il y a généralement encore une différence très petite entre les durées de vibrations. Si les deux mouvements ont commencé en même temps, c'est-à-dire si la différence de phase initiale est nulle, il arrivera, au bout d'un certain nombre de vibrations du diapason horizontal, que le diapason vertical se trouvera, par exemple, en retard sur lui de $\frac{1}{8}$ de vibration. La figure optique, qui était d'abord la diagonale AB du rectangle, se sera donc changée en l'ellipse inclinée n° 2. — Au bout d'un temps égal à celui qui vient de s'écouler, on aura l'ellipse n° 3, et ainsi de suite. — Donc, si l'unisson n'est qu'approximatif, on verra les figures de la première série se transformer *successivement* les unes dans les autres; quand l'un des diapasons aura gagné sur l'autre une vibration entière, la figure primitive se reproduira. Réciproquement, on pourra affirmer que l'unisson est d'autant plus exactement réalisé, que la figure primitive

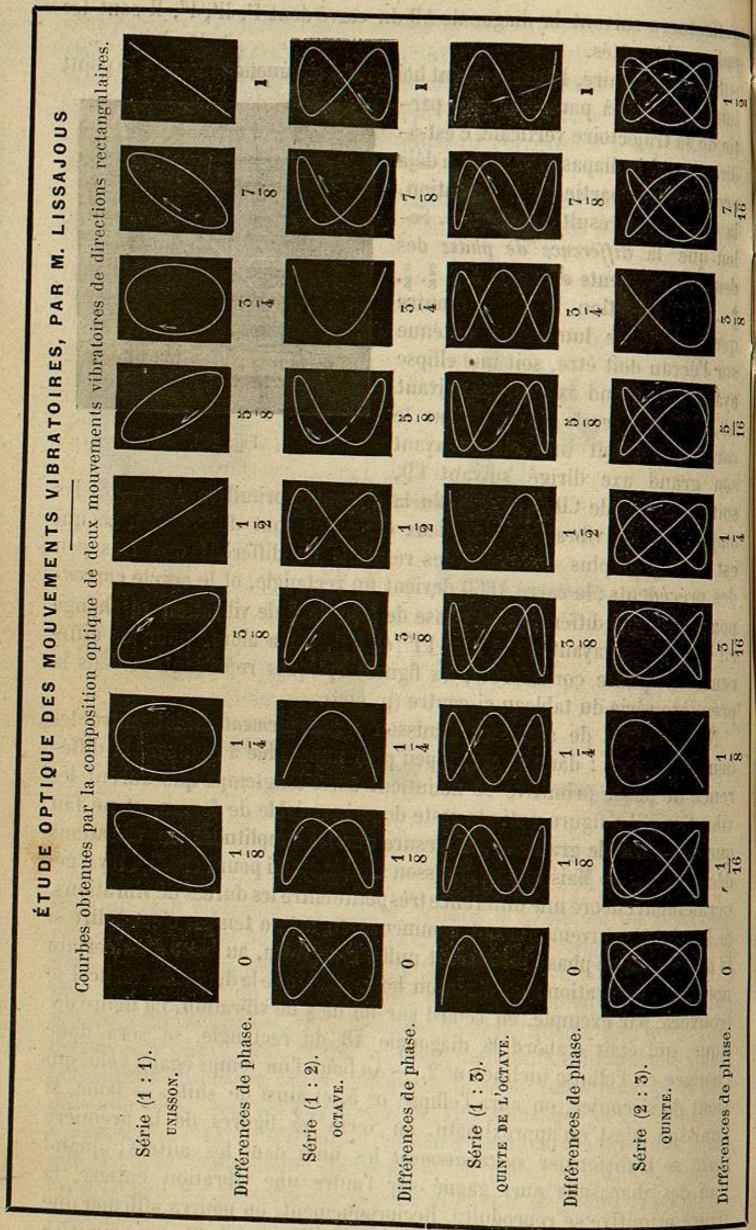

Fig. 547.

mettra un temps plus long à reparaître sur l'écran. — Il est facile de concevoir qu'on puisse déduire de là une méthode permettant de comparer différents diapasons à un même diapason normal.

En remplaçant le diapason D' par un autre qui donne l'*octave* du premier, on obtient les courbes de la deuxième série. — Si l'intervalle d'octave est rigoureusement réalisé, la courbe conserve sa forme et ne fait que diminuer de grandeur. Cette forme dépend d'ailleurs, ainsi que l'indiquent les figures, de la différence de phase initiale des deux sons. — Si l'octave n'est qu'approchée, la courbe primitive prend *successivement* les diverses formes de cette série, et d'autant plus rapidement que le rapport des nombres de vibrations est plus différent de 2.

Si le diapason horizontal donne la *quinte de l'octave* du diapason vertical, c'est-à-dire s'il exécute trois vibrations quand celui-ci n'en fait qu'une seule, on a les courbes de la 3e série. — Enfin, la 4e série correspond à l'accord de *quinte*.

En résumé, à chaque intervalle entre les deux sons, répond une figure optique déterminée (*). — La forme de cette figure demeure invariable, si l'intervalle est rigoureusement établi; elle se modifie, en repassant périodiquement par sa forme primitive, si cet intervalle est légèrement altéré.

(*) A la simple inspection de la courbe obtenue, il est facile de trouver la valeur de l'intervalle des deux sons. — En effet, si le diapason horizontal exécute 4 vibrations pendant que le diapason vertical n'en fait que 3, la courbe optique devra venir, dans un même intervalle de temps, 4 fois en contact avec le côté AC du rectangle, et 3 fois seulement avec le côté AD. On n'aura donc, pour obtenir la fraction qui mesure l'intervalle des deux sons, qu'à prendre pour numérateur le nombre des points où la courbe touche une tangente verticale, et pour dénominateur le nombre des points où la courbe touche une tangente horizontale.