Le premier instrument de ce genre est dû à un Américain, M. R. G. Rhodes, de Chicago. C'est une sorte d'écran en caoutchouc durci, dont la lame est courbée à son extrémité (fig. 389, 1). La personne tient l'instrument par son manche et applique la courbure de la lame contre les dents de sa mâchoire supérieure (fig. 389, 2).

M. Colladon a simplifié cet instrument et l'a rendu, par suite, moins coûteux et plus pratique, en remplaçant le caoutchouc durci par du carton, de l'espèce connue dans le commerce sous le nom de *carton à satiner* ou *carton d'orties*. Une simple feuille, d'une épaisseur de 1 millimètre, taillée dans ce carton, sans manche ni autres accessoires, constitue l'audiphone (fig. 390, 1). On prend à la main le bord rectiligne et l'on appuie le bord convexe contre la mâchoire supérieure (fig. 390, 2 et 2 *bis*), de manière à donner à la feuille une courbure convenable.

Cet instrument permet, dit-on, la perception des sons musicaux et même de la parole articulée, non seulement à des personnes atteintes de surdité simple, mais encore à des sourds-muets.

349. **Stéthoscope.** — On nomme ainsi un petit instrument dont on se sert en médecine pour ausculter les malades. On en a imaginé plusieurs. Nous donnons ici celui qui est construit par Kœnig. C'est une espèce de cornet acoustique (fig. 388, 6) consistant en une capsule de cuivre fermée par une membrane de caoutchouc *c*, et divisée à l'intérieur en deux compartiments par une seconde membrane *a*, de manière qu'en insufflant, par un robinet latéral, de l'air

Fig. 391.

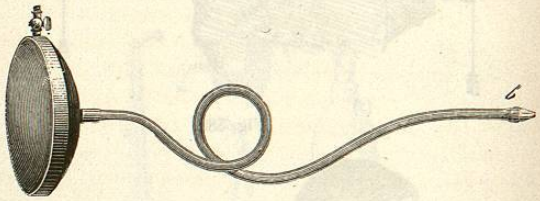

Fig. 392.

entre les deux membranes, elles prennent la forme d'une lentille biconvexe, comme le montre, en coupe, la figure 391. Du centre de la capsule de cuivre part un tuyau de caoutchouc terminé par un bout de corne ou d'ivoire *b*. Le médecin introduit le bout du tube dans son oreille (fig. 392), tout en appliquant la membrane *c* sur la poitrine du malade : les battements du cœur et les bruits de la respiration se transmettent fidèlement à l'air renfermé dans la chambre *ca*, et de là à l'oreille par le tuyau de caoutchouc. On peut même s'ausculter soi-même. Si plusieurs tuyaux sont adaptés à l'appareil, autant d'observateurs peuvent ausculter simultanément le même sujet.

CHAPITRE II

HAUTEUR DU SON

—

MESURE DU NOMBRE DES VIBRATIONS.

350. **Qualités du son musical.** — Le *son* proprement dit, ou *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 trouver un autre son qui soit de même hauteur, ce qui ne peut se faire pour le bruit.

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

Hauteur. — La *hauteur* est la qualité 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 résultent d'un petit nombre de vibrations, et *sons aigus* ceux qui résultent 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.

Nous avons défini la *hauteur* par sa cause physique; on peut la définir aussi par la sensation physiologique, et dire que c'est la qualité qui distingue entre eux les sons de même intensité, produits par un même instrument.

Intensité. — On a vu (343, 2°) 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. C'est ce qui arrive pour une corde tendue, qu'on écarte plus ou moins de sa position d'équilibre.

Timbre. — Le *timbre* est la qualité par laquelle deux sons

provenant de deux instruments différents restent parfaitement distincts, tout en ayant même hauteur et même intensité. 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.

On a longtemps ignoré la cause du timbre; ce n'est qu'en 1864 que M. Helmholtz a fait voir que le timbre particulier qui caractérise un son déterminé, est dû aux sons harmoniques (362) plus ou moins nombreux qui l'accompagnent toujours. Nous reviendrons sur ce sujet en faisant connaître les procédés d'analyse et de synthèse des sons (391).

351. **Méthodes diverses pour mesurer le nombre des vibrations.** — Il n'y a pas d'autre moyen de démontrer que la hauteur d'un son, c'est-à-dire le degré d'acuité ou de gravité d'un son, dépend du nombre plus ou moins grand des vibrations qui lui correspondent, que de mesurer le nombre de vibrations et de comparer les divers sons à ce point de vue. On y arrive par plusieurs méthodes, qui peuvent se contrôler l'une par l'autre. Ce sont :

1° La *méthode acoustique* ou *procédé de la sirène;*

2° La *méthode graphique* ou *procédé de Duhamel;*

3° La *méthode optique* ou *procédé de Lissajous;*

4° La *méthode des flammes manométriques* ou *procédé de Kœnig.*

Ces dernières servent plutôt à comparer les sons entre eux qu'à en mesurer les nombres absolus de vibrations. Nous n'exposerons ici que les deux premières[1].

352. **Méthode acoustique. — Sirène de Cagniard de Latour.** — La *méthode acoustique* s'applique à l'aide d'un petit instrument, appelé *sirène.* Cagniard de Latour, qui en est l'inventeur, lui a donné le nom de sirène, parce qu'on peut lui faire rendre des sons, le *faire parler*, comme on dit, dans l'eau.

Description. — La figure 393 représente, en perspective, la sirène montée sur le *sommier* d'une *soufflerie* (354) et les figures 394 et 395 en donnent les détails de construction. A la partie inférieure de l'instrument, qui est tout en cuivre, est une caisse cylindrique O, recouverte d'un plateau fixe B. Sur ce plateau s'appuie une tige verticale T, à laquelle est fixé un disque A, qui peut tourner librement avec la tige; des trous circulaires équidistants sont pratiqués dans le plateau B, et dans le disque A se trouvent un nombre égal de trous de même grandeur et à la même distance du centre que ceux du plateau. Ces trous ne sont point perpendiculaires aux surfaces du plateau et du disque; mais, les uns étant tous inclinés d'un même angle et dans le même sens, les autres sont tous inclinés en sens contraire, de manière que, lorsque les trous du plateau et ceux du disque sont en regard, ils sont opposés l'un à l'autre, comme le représente la figure 394 en *m* et *n*. Il résulte de cette disposition que, lorsqu'un

1. Voir les autres méthodes dans Jamin et Bouty, *Cours de physique de l'École polytechnique*, t. III.

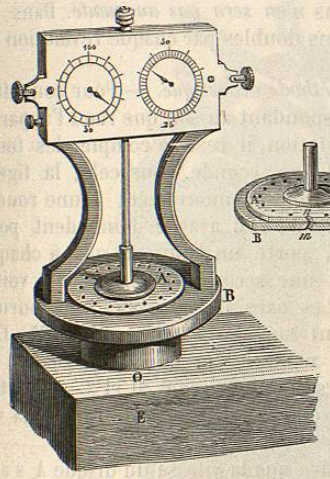

Fig. 393.

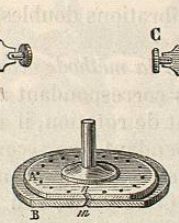

Fig. 394.

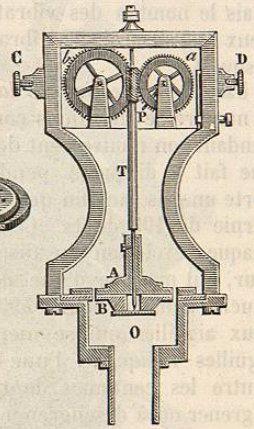

Fig. 395.

courant d'air rapide arrive de la soufflerie dans la caisse cylindrique et dans le trou *m*, il frappe obliquement les parois du trou *n*, et imprime au disque A un mouvement de rotation dans le sens A*n*.

Théorie. — Pour simplifier l'explication, supposons d'abord que, le disque mobile A portant 18 trous, le plateau fixe B ne soit percé que d'un seul. Considérons le cas où le trou inférieur coïncide avec l'un des trous supérieurs. Le vent de la soufflerie vient alors frapper obliquement celui-ci, le disque mobile se met à tourner, et le plein qui se trouve entre deux trous consécutifs vient fermer le vide du plateau inférieur. Mais, le disque continuant à tourner en vertu de sa vitesse acquise, deux trous se trouvent de nouveau en regard, d'où résulte une nouvelle impulsion, et ainsi de suite. De la sorte, pendant une révolution complète du disque, l'orifice inférieur est 18 fois ouvert et 18 fois fermé. Il en résulte un cou-

rant intermittent qui fait entrer l'air en vibration, et finit ainsi par produire un son, quand les impulsions successives sont suffisamment nombreuses. Si l'on suppose, comme cela existe réellement, que le plateau fixe B ait 18 trous comme le disque tournant, le phénomène vibratoire se produira exactement de la même façon, parce que les 18 trous seront successivement fermés et ouverts en même temps que le trou unique de tout à l'heure; les 18 trous vibreront donc à l'unisson; le son sera 18 *fois plus intense*, mais le nombre des vibrations *n'en sera pas augmenté*. Dans les deux cas, il est de 18 vibrations doubles par chaque révolution du disque A.

Usage : Application de la méthode acoustique. — Pour connaître le nombre de vibrations correspondant au son que rend l'appareil pendant son mouvement de rotation, il reste à compter les tours que fait le disque A pendant une seconde. Pour cela, la tige T porte une vis sans fin qui transmet le mouvement à une roue *a* garnie de 100 dents. Cette roue, qui avance d'une dent pour chaque révolution du disque, porte un taquet P, qui, à chaque tour, fait marcher d'une dent une seconde roue *b*, qu'on voit à gauche dans la figure 395. Les axes de ces roues font tourner deux aiguilles qui se meuvent sur des cadrans (fig. 393). Ces aiguilles indiquent, l'une le nombre des tours du disque A, l'autre les centaines de tours. Deux boutons D et C servent à engrener ou à désengrener à volonté la petite roue *a* avec la vis sans fin.

Comme le son s'élève à mesure que la vitesse du disque A s'accroît, il suffit de forcer le vent de la soufflerie pour faire rendre à l'appareil un son déterminé. On entretient alors la vitesse de ce courant d'air pendant un certain temps, 20 secondes par exemple; puis on lit les indications des deux cadrans. En multipliant ce nombre par 18 et divisant le produit par le nombre de secondes 20, le quotient indique le nombre de vibrations doubles par seconde correspondant au son donné. Soit *n* le nombre des unités de tour, et *c* celui des centaines : le nombre N cherché sera donné par la formule

$$N = \frac{18(n + 100c)}{20}.$$

Remarque. — On a constaté que la sirène, à vitesse égale, donne le même son sous l'eau que dans l'air; il en est de même dans tous les gaz : cela prouve que la hauteur d'un son déterminé ne dépend que *du nombre* des vibrations, et non *de la nature* du corps sonore.

353. **Sirène de Seebeck.** — On peut appliquer la même méthode à l'aide d'une autre *sirène*, construite par Seebeck. C'est un instrument plus compliqué que celui de Cagniard de Latour, mais qui permet de faire des expériences et des mesures beaucoup plus variées. Il est d'ailleurs fondé sur le même principe. Le son est produit par un courant d'air qui passe d'une manière discontinue par les trous d'un disque tournant. Ce disque est généralement en carton et porte sur sa circonférence plusieurs séries de trous plus ou moins nombreux. Il est animé d'un mouvement très régulier à l'aide d'un mécanisme d'horlo-

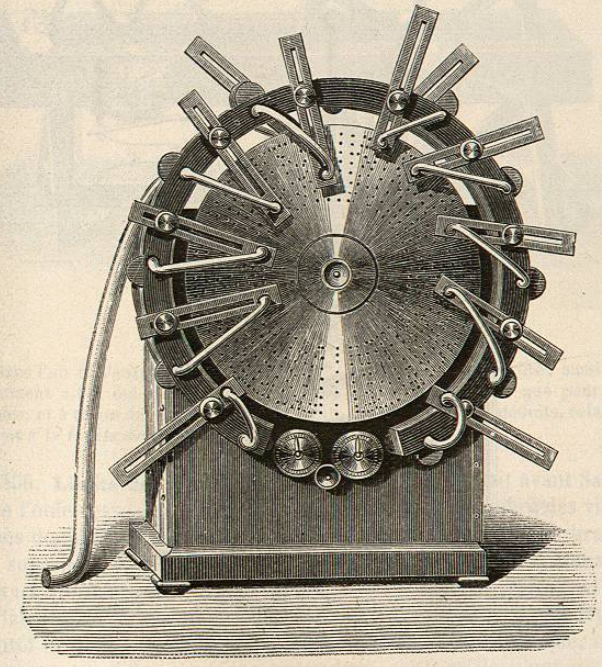

Fig. 396.

gerie contenu dans un socle en bois (fig. 396). Le système est porté sur un *sommier*, ou réservoir à vent, qui distribue le courant d'air, par l'intermédiaire d'un *porte-vent* en caoutchouc, à celle des séries de trous sur laquelle on veut expérimenter.

On peut d'ailleurs placer une série d'autres disques sur l'appareil, ce qui permet de varier les expériences.

354. **Soufflerie.** — L'appareil qui sert à faire *parler* la sirène, et en général toute espèce de tuyaux sonores, s'appelle une *soufflerie*. Il se compose d'un fort soufflet S, qui est placé entre les quatre pieds d'une table et qui fonctionne au moyen d'une pédale P (fig. 397). L'air refoulé par le soufflet se rend dans un réservoir de cuir R, très flexible, qui se gonfle à mesure que l'air y arrive

Comprimé par deux plaques de plomb qui chargent le réservoir, l'air passe ensuite par un tuyau A dans une boîte *mn*, placée sur la table, qu'on nomme le *sommier*. Cette boîte sert à la fois de support et de *distributeur de l'air* pour les tuyaux. Les trous dans lesquels s'engagent les embouchures des tuyaux sont fermés par des soupapes *s* (fig. 398) qui s'opposent au passage de l'air; mais devant chaque tuyau est une touche *a*, qui, lorsqu'on appuie dessus, fait ouvrir la soupape et laisse passer l'air. Au-dessous de la soupape est un ressort *r*, qui la relève automatiquement dès qu'on cesse d'appuyer sur la touche.

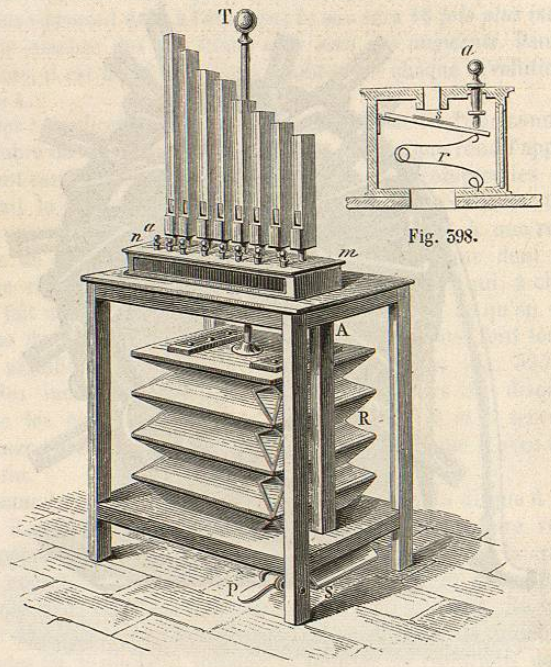

Fig. 398.

Fig. 397.

355. **Roue dentée de Savart.** — On peut encore appliquer la méthode acoustique à l'aide d'un autre instrument dû à Savart, la *roue dentée*. Le mécanisme en est encore plus simple que celui de la sirène. Les sons se produisent à l'aide d'une carte E (fig. 399) que l'on appuie fortement à la main contre les bords d'une roue métallique dentée, qui tourne plus ou moins vite, par l'intermédiaire d'une grande roue à manivelle. Il se produit *une vibration double* à chaque passage d'une dent : le nombre des vibrations qui se produisent en un temps donné dépend donc à la fois du nombre des dents de la roue et de sa vitesse de rotation ; il est mesuré automatiquement à l'aide d'un compteur spécial, analogue à celui de la sirène. Pour produire les *sons graves*, Savart substituait à la roue dentée une simple barre de fer, de 65 centimètres de longueur, qu'il faisait tourner entre deux lames de bois mince, distantes entre elles de

4 millimètres seulement. A chaque passage de la lame, il se produisait une espèce de bruit sec, dû au déplacement brusque de l'air ; pour une vitesse suffisante, tous ces chocs se confondaient en un son continu, très plein et plus ou moins grave. Au contraire, les sons de la roue dentée étaient plus ou moins aigus.

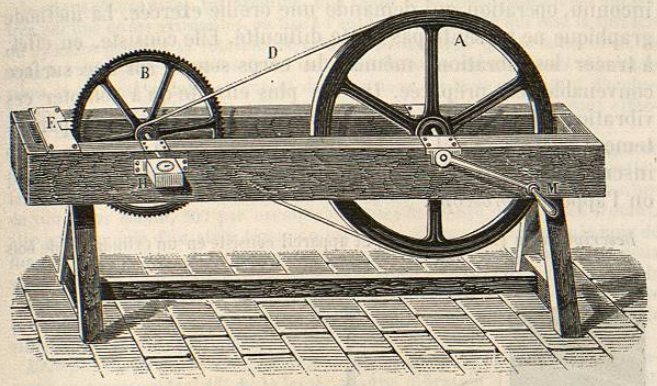

Fig. 399.

Dans l'un et l'autre cas, ces sons étaient de très mauvaise qualité : aussi l'instrument a-t-il été abandonné rapidement. Nous ne le citons que pour mémoire, et à cause des résultats intéressants que Savart en a déduits, relativement à la *limite de perceptibilité* des sons.

356. **Limite des sons perceptibles.** — On admettait avant Savart que l'ouïe cesse de percevoir les sons lorsque le nombre des vibrations doubles par seconde est inférieur à 16 pour les sons graves, et supérieur à 9000 pour les sons aigus. Mais les travaux de Savart ont démontré que ces limites sont trop resserrées, et que la faculté de percevoir les sons très graves ou très aigus dépend plutôt de leur intensité que de leur hauteur; en sorte que, si les sons extrêmes ne sont pas entendus, c'est qu'ils n'ont pas été produits avec une intensité suffisante pour impressionner l'organe de l'ouïe.

A l'aide de sa *roue dentée*, Savart a pu reculer la limite des sons aigus jusqu'à 24 000 vibrations doubles par seconde et la limite des sons graves jusqu'à 8 vibrations doubles.

Despretz a fait des recherches sur le même sujet à l'aide d'une série de *diapasons* (368), accordés à l'octave les uns des autres. Il a trouvé 16 vibrations doubles pour limite des sons graves, et 36 850 pour limite des sons aigus[1].

1. Cela fait 73 700 vibrations simples, qui correspondent à $ré_{10}$ (ut_1 étant re-

357. **Méthode graphique. — Vibroscope de Duhamel.** — Avec l'un quelconque des instruments précédents, il est difficile de déterminer avec précision le nombre des vibrations correspondant à un son donné, parce qu'il faut les faire parler à l'*unisson* du son inconnu, opération qui demande une oreille exercée. La méthode graphique ne présente pas cette difficulté. Elle consiste, en effet, à tracer les vibrations mêmes du corps sonore sur une surface convenablement préparée. On n'a plus ensuite qu'à compter ces vibrations, qui sont inscrites sous la forme de sinuosités parfaitement visibles à l'œil nu. Le dispositif qui sert à produire cette inscription est dû, ainsi que la méthode elle-même, à Duhamel : on l'appelle *vibroscope*.

Description du vibroscope. — Cet appareil consiste en un cylindre A, de bois

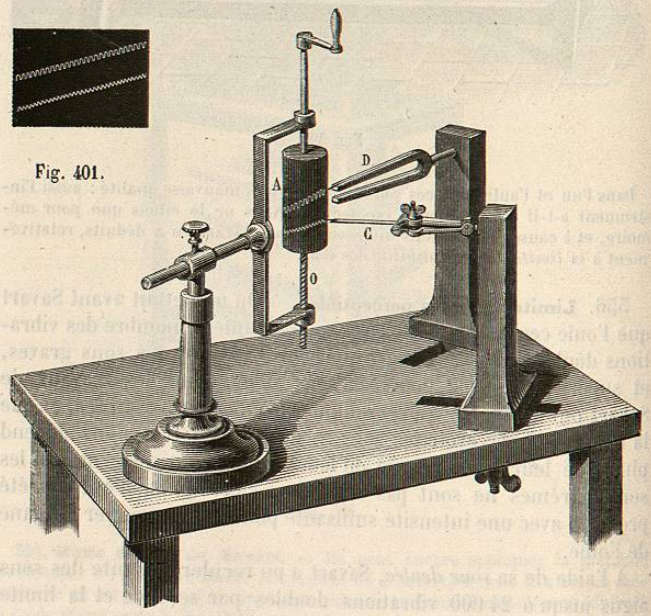

Fig. 401.

Fig. 400.

ou de métal, fixé à un axe vertical O (fig. 400). On fait tourner celui-ci à l'aide

présenté par 128 vibrations) (369). L'oreille était d'ailleurs péniblement affectée par la perception de ce son extrême, qui dépasse de beaucoup la limite des sons musicaux. D'après M. Helmholtz, les sons d'un bon emploi en musique sont compris entre 40 et 4000 vibrations doubles, dans une étendue de 7 octaves.

d'une manivelle, et, tout en tournant dans un sens ou dans l'autre, il prend un mouvement de haut en bas ou de bas en haut, au moyen d'un pas de vis tracé sur l'axe même et passant dans un écrou. Autour du cylindre est enroulée une feuille de papier sur laquelle on a déposé une couche légère et non adhérente de noir de fumée. C'est sur cette couche que s'inscrivent les vibrations.

Le corps sonore étant, par exemple, une lame élastique C, solidement encastrée par une de ses extrémités, on fixe à l'autre un style léger qui rase la surface du cylindre pendant sa rotation. Si celui-ci tourne sans que la lame vibre, le style trace en blanc sur le fond noir un trait hélicoïdal régulier ; mais si la lame vibre, le trait est ondulé, et autant de vibrations de la lame, autant d'ondulations. Il ne reste plus qu'à déterminer le temps pendant lequel se sont effectuées ces vibrations.

On peut y arriver de plusieurs manières. La plus simple consiste à comparer la courbe tracée par la lame vibrante à une autre courbe, qu'on trace parallèlement à la première à l'aide d'un diapason donnant par seconde un nombre de vibrations connu, 500 par exemple. Une des branches du diapason D étant, elle aussi, munie d'un style léger, on met celui-ci en contact avec le noir de fumée, puis on fait vibrer simultanément la lame et le diapason ; les deux styles tracent alors deux hélices ondulées, mais inégales. Or, en déroulant la feuille de papier (fig. 401), et en comparant les nombres d'oscillations qui se correspondent sur les deux courbes, il est facile d'en déduire le nombre de vibrations produites par seconde.

Exemple numérique. — Par exemple, supposons qu'à 150 vibrations du diapason en correspondent 165 de la lame ; chaque vibration du diapason durant, par hypothèse, $\frac{1}{500}$ de seconde, 150 vibrations correspondent à $\frac{150}{500}$ de seconde ; c'est donc en $\frac{150}{500}$ de seconde que la lame a fait 165 vibrations. Par suite, en $\frac{1}{500}$ de seconde elle en fait $\frac{165}{150}$, et en une seconde $\frac{165 \times 150}{150}$, ou 550.

358. **Phonautographe.** — Le vibroscope de Duhamel et les appareils enregistreurs analogues ne permettent d'inscrire que les mouvements vibratoires simples, tels que ceux d'un diapason, d'une verge métallique, etc. Un autre appareil enregistreur, le *phonautographe* [1], permet d'inscrire les vibrations compliquées des ondes sonores aériennes. Il se compose d'un large paraboloïde, en porcelaine, ou en faïence (ou en toute autre substance peu élastique), qui est coupé dans le plan de son foyer (fig. 402). On ferme cet orifice par une membrane élastique, munie d'un style sur sa face extérieure. Les ondes aériennes, provenant d'un corps sonore qu'on fait résonner à l'embouchure du paraboloïde, sont concentrées par les parois mêmes de celui-ci sur la membrane du plan focal. Celle-ci entre en vibration, et inscrit les mouvements complexes qu'elle reçoit sur un cylindre enregistreur, qui tourne uniformément, par un mouvement d'horlogerie, à la portée du style mobile. On obtient aussi des courbes plus ou moins compliquées, qui constituent une sorte d'*écriture acoustique* des sons émis par le corps sonore.

359. **Phonographe.** — Le *phonographe*, récemment inventé (en 1877) par M. Edison, peut être considéré comme un perfectionnement, très original et très important d'ailleurs, du phonautographe de Scott. C'est un appareil enregistreur qui inscrit les ondes aériennes, non plus sur papier noirci, mais sur une feuille métallique : celle-ci en conserve les empreintes, qui permettent, à leur tour, de reproduire à volonté les sons auxquels elles correspondent.

Description. — La figure 403 donne une vue perspective du phonographe d'Edison. Il se compose d'un cylindre de laiton A, monté sur un axe D, qui est muni d'un pas de vis sur la moitié de sa longueur. Sur le cylindre est tracée une rainure hélicoïdale de même pas que la vis D. Par suite, lorsqu'on fait

1. Inventé par un ouvrier mécanicien, appelé Scott.

tourner le cylindre au moyen de la manivelle M, à chaque tour la rainure avance d'une longueur égale à son pas. Sur la rainure est appliquée une feuille d'étain, ou de cuivre très mince, qui l'enveloppe. Enfin, en avant du cylindre

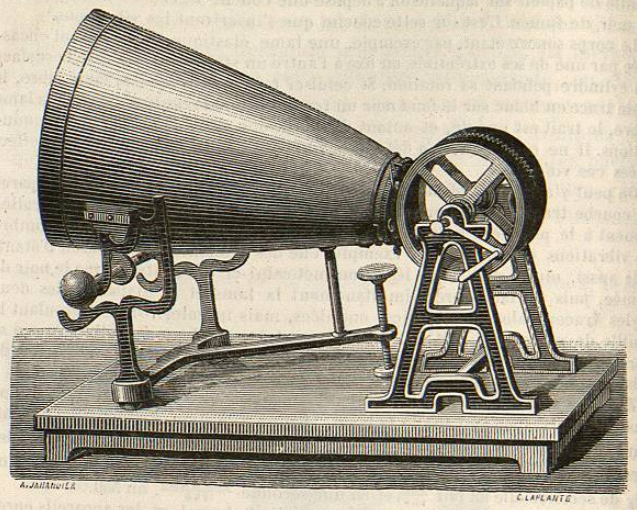

Fig. 402.

est une embouchure B, destinée à recueillir et à concentrer les ondes sonores (fig. 404) sur une plaque vibrante r; celle-ci s'appuie directement sur un tube de caoutchouc e, et ce dernier sur une lame élastique i, terminée par un poin-

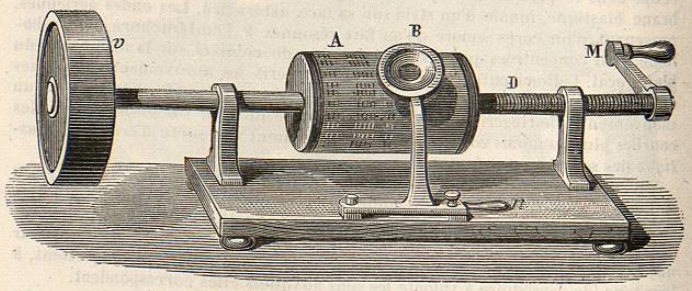

Fig. 403.

çon d'acier. Ce poinçon doit jouer le même rôle que le style du phonautographe; il rase la feuille d'étain, et il est ajusté de manière à correspondre à la rainure pendant sa rotation. (La plaque vibrante, qui remplace ici la membrane de Scott, est représentée en coupe, avec ses accessoires, dans la figure 404.)

Fonctionnement. — Pour faire fonctionner l'appareil, on parle à haute voix dans l'embouchure, le plus près possible de la plaque r, en ayant soin de tourner en même temps la manivelle M de gauche à droite. La plaque r vibrant alors à l'unisson de la voix, ses vibrations se transmettent à la lame i et au poinçon, qui trace, sur la feuille métallique, un gaufrage plus ou moins saillant, suivant l'intensité de la voix. Il reste maintenant à faire répéter par le phonographe les paroles qu'il a ainsi enregistrées.

A cet effet, à l'aide d'une poignée n, on fait tourner sur son pied et on amène en avant l'embouchure B; puis, faisant tourner la manivelle de droite à gauche, on ramène le cylindre à sa première position; y ramenant ensuite l'embouchure, et tournant, comme la première fois, de gauche à droite, le cylindre avance de nouveau, et c'est alors que l'appareil se met à répéter à haute voix les paroles qu'il a enregistrées. Dans la première partie de l'expérience, c'est la membrane vibrante qui a agi sur le poinçon, et celui-ci sur la feuille d'étain; maintenant il se produit un phénomène de *réversibilité :* c'est la feuille dont le gaufrage réagit sur le poinçon, et la lame i de ce dernier sur le caoutchouc et sur la lame r, laquelle reçoit ainsi exactement les mêmes vibrations que la première fois et reproduit les mêmes sons. On conçoit d'ailleurs qu'il y ait une perte plus ou moins grande de force vive, de sorte que les paroles répétées par l'instrument ont beaucoup perdu de leur intensité : le son est même grêle et désagréable.

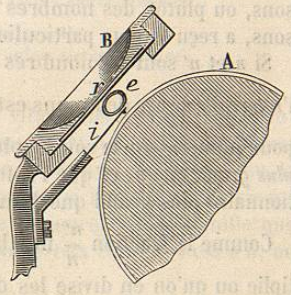

Fig. 404.

Remarque. — Dans ces expériences, il importe, surtout pour le chant, d'imprimer à la manivelle une vitesse de rotation uniforme, sinon le son fourni par l'instrument n'a plus la même hauteur que le son primitif. On obtient la régularité nécessaire à l'aide d'un mouvement d'horlogerie qui fait tourner le cylindre A par l'intermédiaire d'un volant v, dont on munit les phonographes actuellement construits.

CHAPITRE III

HAUTEUR DU SON

—

CLASSEMENT DES SONS MUSICAUX. — THÉORIE DE LA GAMME.

360. **Classement des sons. — Intervalles musicaux.** — Les méthodes précédentes permettent de caractériser chaque son musical, de le définir en quelque sorte par le nombre de vibrations qui lui correspond dans le corps sonore. Tel son correspond à