

séparées par des lignes nodales. — On peut le démontrer en mettant de l'eau dans un verre à pied, et en attaquant avec un archet l'un des points du bord du verre : on voit la surface de l'eau se partager en un certain nombre de parties, dans lesquelles le liquide éprouve une vive agitation; entre ces parties, se trouvent des lignes de repos, où le liquide reste immobile.

452. Vibrations des membranes. — Les membranes flexibles, comme les peaux que l'on tend sur les tambours, les feuilles de papier collées sur des cadres de bois, rendent des sons quand on les frappe ou qu'on les ébranle d'une manière quelconque. Elles peuvent aussi entrer en mouvement sous l'influence des vibrations qui leur sont transmises, au voisinage d'un timbre vibrant ou d'un tuyau sonore : le sable répandu à leur surface accuse la formation de lignes nodales, généralement très compliquées. — L'expérience montre qu'une même membrane peut, avec une tension déterminée, rendre une série de sons, assez nombreux et assez voisins les uns des autres pour qu'on puisse, dans la pratique, considérer la membrane comme capable de vibrer à l'unisson de tous les sons qui ne s'écartent pas trop du son fondamental. — Lorsqu'on fait varier la tension, on modifie à la fois le son fondamental et toute la série des sons que la membrane peut rendre.

Ces propriétés trouvent leur application dans la perception des sons. Sous l'action des ondes sonores recueillies par le pavillon de l'oreille, la *membrane du tympan* entre en vibration; son mouvement se communique, soit par la chaîne des *osselets*, soit par l'air de l'*oreille moyenne*, aux membranes de la *fenêtre ronde* et de la *fenêtre ovale*, l'une et l'autre en contact avec le liquide qui remplit l'*oreille interne*; on conçoit donc que les ramifications du nerf acoustique, qui s'épanouissent à l'intérieur de ce liquide, entrent elles-mêmes en vibration, et transmettent à l'encéphale l'impression sonore.

CHAPITRE V

TIMBRES DES SONS

453. Sons composés. — Causes générales du timbre. — Lorsqu'on écoute avec attention le son rendu par une corde de piano ou par une corde de violon, vibrant dans toute sa longueur, on entend généralement, en même temps que le son fondamental, un ou plusieurs de ses harmoniques : en d'autres termes, la sensation perçue par l'oreille est celle d'un *son composé*.

Pour se rendre compte de ce phénomène, il suffit de répéter l'expérience sur la corde d'un sonomètre : il n'est pas difficile de constater que la corde, tout en exécutant ses mouvements de totalité, se subdivise en un certain nombre de parties, dont les mouvements propres se superposent au mouvement d'ensemble. — Lorsque, par exemple, la corde donne *simultanément* les sons 1 et 2, elle vibre tout d'une pièce comme la corde AB (*fig. 292*) et produit ainsi le son fondamental; mais,

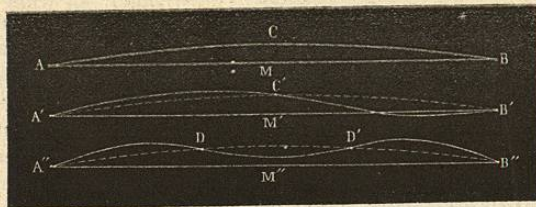


Fig. 292.

en même temps, elle se partage en deux parties A'C', C'B', dont chacune vibre en même temps comme une corde de longueur moitié moindre ces deux mouvements simultanés sont représentés sur la corde A'B'. — De même, quand on entend à la fois les sons 1 et 3, la corde se subdivise, comme A''B'', en trois parties égales, qui exécutent trois vibrations pendant que la corde tout entière en fait une seule (*).

(*) Les mouvements vibratoires sont toujours de sens contraire dans deux segments consécutifs de la corde; on le démontrerait en répétant, sur une corde entièrement libre entre ses extrémités, l'expérience de Duhamel (*Note* de la page 351). — Par là s'explique l'observation suivante, faite par Delezenne. Quand on attaque une corde

Dans ces divers cas, l'impression dominante est celle du son fondamental; mais l'oreille attribue, à chacun de ces sons de même hauteur, un caractère spécial, une sorte de *timbre* particulier, résultant de la superposition de tel ou tel harmonique avec le son fondamental.

C'est l'extension de ces remarques qui a conduit M. Helmholtz à considérer les caractères de timbre, qui distinguent entre eux les sons de divers instruments, comme dus à des causes de cette nature. — La méthode qu'il a employée pour manifester, dans un son complexe, l'existence des harmoniques, est fondée sur le phénomène du *renforcement des sons*.

454. Renforcement des sons. — Voici une expérience qu'il est facile de répéter. On se place auprès d'un piano, on éloigne les étouffoirs en appuyant sur la pédale, et on fait entendre, avec un violon ou avec la voix, une note déterminée : on constate que, parmi les cordes du piano, celles qui peuvent rendre, soit cette note, soit l'un de ses harmoniques, entrent en vibration; le son acquiert ainsi pour l'oreille un *renforcement* remarquable. — Or, dans cette expérience, la transmission du mouvement s'est effectuée par l'air, mais elle n'a pas mis en vibration toutes les cordes du piano. Donc, pour qu'un son se transmette à des corps voisins et leur fasse jouer le rôle de renforçants, il faut qu'il y ait, entre ce son et ceux que ces corps peuvent rendre, certains rapports déterminés, les rapports d'un son à ses harmoniques.

Quand un corps sonore est en contact avec les parois d'une cavité contenant de l'air, cet air peut entrer en vibration et résonner comme un tuyau sonore, à la condition que les dimensions de la cavité soient convenables. — C'est le principe des *caisses sonores*, qui entrent dans la construction des instruments à cordes. — C'est ce qui conduit aussi à placer les diapasons sur des caisses rectangulaires de bois (fig. 293), dont les dimensions dépendent du son rendu par le diapason lui-même. Le diapason étant mis en vibration, on constate, en le plaçant sur la caisse, que le son acquiert une intensité beaucoup plus grande. Au moment où les vibrations du diapason commencent à s'éteindre, la caisse peut encore rendre le son perceptible, alors qu'il serait impossible de l'entendre sans ce renforcement.

exactement en son milieu, on n'obtient aucun son; c'est que l'archet imprime aux points situés de part et d'autre du milieu, et très près de ce point, des vitesses de même sens : ces vitesses ne peuvent se concilier avec la production de l'harmonique 2. — Marloye a généralisé la remarque de Delezenne, en montrant qu'on ne peut pas non plus faire vibrer transversalement une corde en l'attaquant exactement au tiers, au quart, au cinquième de sa longueur. — On conçoit, d'après ces remarques, que le rang des harmoniques qui se produisent en même temps que le son fondamental dépend de la position particulière du point où la corde est attaquée. C'est pour cette raison que, dans le piano, les marteaux sont disposés de manière à frapper chacune des cordes exactement au *septième* de sa longueur. L'harmonique qui correspondrait à la division de la corde en sept parties égales produirait, avec le son fondamental, une *dissonance*: grâce à cette disposition, cet harmonique ne peut se produire. La production simultanée des autres harmoniques contribue, au contraire, à rendre le son plus agréable à l'oreille.

Voici encore une expérience destinée à montrer que les colonnes d'air

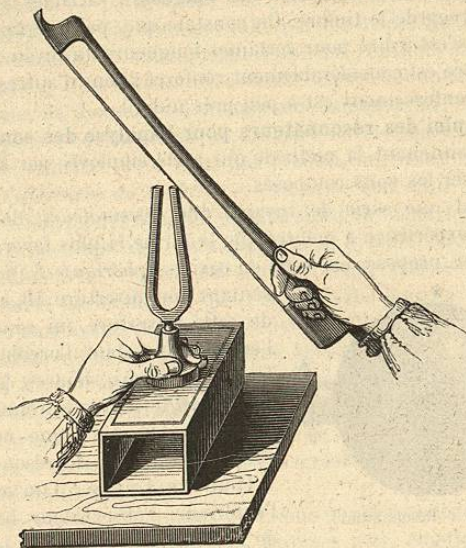


Fig. 293. — Diapason avec caisse sonore.

doivent offrir des dimensions déterminées, pour renforcer un son de

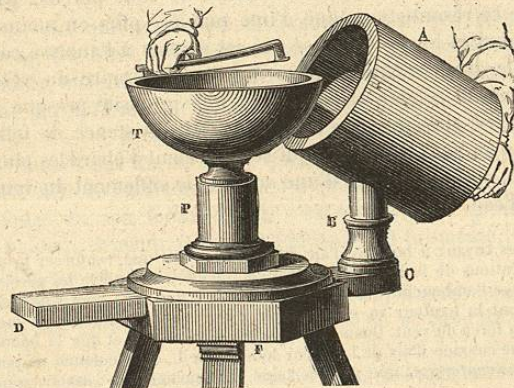


Fig. 294. — Timbre avec tuyau renforçant.

telle ou telle hauteur. — On fait vibrer un timbre de bronze T (fig. 294) au moyen d'un archet. On en approche l'ouverture d'un tuyau A,

fermé à son autre extrémité par un piston que l'on fait mouvoir avec la main, de manière à donner des longueurs variables à la partie du tuyau qui regarde le timbre. On constate que, pour certaines positions du piston, c'est-à-dire pour certaines longueurs du tuyau, le son rendu par le timbre est considérablement renforcé; pour d'autres positions du piston, le renforcement est à peu près nul (*).

455. Emploi des résonateurs pour l'analyse des sons composés. — Voici maintenant la méthode qui a été employée par M. Helmholtz, pour analyser les sons composés.

On prend une série de tuyaux, dits *résonateurs*, de dimensions diverses. L'expérience a montré que la forme la plus favorable, pour le but qu'on se propose, est celle de cavités *sphériques* S (fig. 295), présentant une ouverture AB, et, à l'opposé de cette ouverture, un conduit MN que l'on introduit dans l'oreille. Dans cette forme de tuyaux sonores, le son *fondamental* est le seul qui prenne nettement naissance : c'est ce que nous appelons le *son propre* du résonateur.

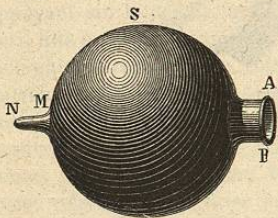


Fig. 295. — Résonateur.

Pour faire l'analyse d'un son produit à l'extérieur, l'observateur bouche l'une de ses oreilles; dans son autre oreille, il introduit, l'un après l'autre, les conduits de divers résonateurs, de dimensions telles que leurs sons propres correspondent à diverses notes de l'échelle musicale. A chaque expérience, les sons qui diffèrent du son propre du résonateur employé ne sont perçus, par l'oreille munie de ce résonateur, que d'une manière plus ou moins confuse. Au contraire, si le son composé qui est soumis à l'analyse contient un son simple ayant même hauteur que le son propre du résonateur, l'oreille entend éclater ce son, avec une intensité presque assourdissante. — C'est ainsi que l'on a pu constater l'existence de telle ou telle note, dans les sons complexes qui sembleraient d'abord les plus difficiles à analyser, comme le bruit d'une voiture, le sifflement du vent, le murmure de l'eau, etc.

(*) Dans les tuyaux à bouche, l'air du tuyau ne fait que renforcer le son produit par les vibrations de la lèvres *b* (fig. 269). Si, en effet, on enlève les parois du tuyau, on peut, avec l'embouchure et la lèvres *b*, obtenir des sons dont l'intensité est très faible, et dont la hauteur va en croissant d'une manière continue, à mesure qu'on augmente la force du vent. Quand le tuyau est reconstitué, et que la bouche est surmontée d'une colonne d'air de longueur déterminée *L*, cette colonne ne peut jouer le rôle de corps *renforçant* que pour certains sons particuliers : savoir, ceux dont les nombres de vibrations satisfont à la relation $n = (2p + 1) \frac{v}{4L}$, s'il s'agit d'un tuyau

fermé, ou à la relation $n' = p \frac{v}{2L}$, s'il s'agit d'un tuyau ouvert (note de la page 544)

— La même remarque est applicable aux tuyaux à anche.

456. Résultats relatifs aux timbres des divers instruments, ou de la voix humaine. — La méthode des résonateurs a été appliquée à l'analyse comparative des sons produits par les divers instruments, ou par la voix humaine. — Voici quelques-uns des résultats obtenus.

1° Lorsque des instruments de diverses espèces donnent une même note musicale, ils donnent un même son fondamental; mais chacun d'eux superpose à ce son tel ou tel *groupe d'harmoniques*, avec telle ou telle *intensité relative* : c'est là ce qui produit, entre les divers instruments, les *différences de timbres*. — Ainsi, le son d'un diapason, ou ceux que rendent, sous l'action d'un courant d'air faible, les gros tuyaux fermés de l'orgue, sont des sons simples, ou presque dénués d'harmoniques : le timbre de ces sons est sourd et sans éclat. — La présence des six premiers harmoniques, que l'on constate dans les notes graves du piano ou dans celles des tuyaux ouverts de l'orgue, donne aux sons de la plénitude et de l'éclat. — Dans le violon ou le violoncelle, le nombre des harmoniques superposés est généralement assez considérable, et d'autant plus grand que la corde est plus fine. De là, cette espèce de caractère d'acuité, que présente le timbre de ces instruments, et qui arrive à en rendre l'audition désagréable lorsqu'ils sont maniés par des exécutants inhabiles (*).

Ce sont encore des différences du même genre qui distinguent entre elles les *diverses voix* humaines. — Diverses voix, émettant *une même note sur une même voyelle*, lui impriment chacune un timbre particulier, que l'oreille reconnaît immédiatement, et qui dépend de la coexistence de tel ou tel groupe d'harmoniques, se superposant au son fondamental.

2° Quant aux différences qui distinguent, pour une même voix, les *diverses voyelles*, elles sont dues à une autre particularité. — D'après M. Helmholtz, chaque voyelle correspond à *un son de hauteur constante*, déterminé par la forme que prend la bouche en laissant passer l'air qui la traverse. — On peut donc dire que les voyelles se distinguent les unes des autres par un caractère qui offre quelque analogie avec celui du *timbre*. Mais ce caractère, au lieu d'être dû à l'addition de certains harmoniques du son fondamental, c'est-à-dire à un groupe de sons dont la hauteur dépendrait du son fondamental lui-même, est dû à un son qui dépend de la voyelle émise (**).

La pratique du chant a d'ailleurs montré, depuis longtemps, que l'émission des notes de diverses hauteurs ne se produit pas avec la

(*) Avec des cordes *métalliques* très fines, l'emploi des résonateurs a permis de compter jusqu'à seize harmoniques superposés. C'est à la présence des harmoniques élevés qu'est dû le timbre siffant des sons que rendent ces cordes.

(**) Dans la voix articulée, les *consonnes*, qui viennent s'ajouter aux voyelles, transforment en sons plus complexes les sons additionnels qui caractérisent chacune des voyelles, sans modifier la hauteur de l'impression dominante.

même facilité sur les diverses voyelles : que, par exemple, les notes graves sont plus faciles à donner sur la voyelle O ou sur le son OU; les notes moyennes, sur la voyelle A; les notes élevées, sur la voyelle É ou È. — Ces résultats sont aujourd'hui faciles à expliquer. La cavité de la bouche se comporte, en effet, comme une caisse de résonance, renforçant plus ou moins les sons produits par le larynx, selon les rapports qu'ils présentent avec le son propre de cette cavité. Or, suivant que la bouche prend la forme appropriée à l'émission de la voyelle allemande OU, ou à celle de nos voyelles O, A, É, I, on a pu constater que le son propre de sa cavité va successivement en s'élevant : par suite, la forme de la bouche devient apte à renforcer des sons de plus en plus élevés.

3° Enfin, l'emploi des résonateurs a montré que les bruits se distinguent des sons musicaux, en ce qu'ils sont formés par la superposition de sons élémentaires qui ne sont point entre eux dans des rapports simples. — L'oreille n'éprouve alors qu'une sensation vague, à laquelle elle peut difficilement attribuer un caractère de hauteur, quand elle compare ces bruits à des sons musicaux. Les rapports de hauteurs ne deviennent appréciables que lorsqu'on compare entre eux plusieurs bruits analogues (404).

457. Méthode de synthèse des sons composés. — Les résultats qu'avait fournis l'analyse par les résonateurs ont été confirmés par M. Helmholtz à l'aide d'une véritable méthode de synthèse, consistant à recomposer des sons complexes au moyen des divers sons élémentaires qu'on y a reconnus.

L'appareil comprend une série de diapasons, donnant les harmoniques successifs du son rendu par le plus grave d'entre eux, et disposés de façon que l'on puisse entretenir le mouvement vibratoire de chacun d'eux, à l'aide d'électro-aimants qui agissent périodiquement par attraction sur leurs branches. En présence de chaque diapason, est placé un tuyau renforçant, que l'on peut ouvrir plus ou moins au moyen des touches d'un clavier, sur lesquelles on appuie plus ou moins fortement. En faisant vibrer tous les diapasons à la fois et en ouvrant plus ou moins tels ou tels tuyaux renforçants, l'expérimentateur peut ainsi ajouter au son fondamental tels ou tels harmoniques, avec telle ou telle intensité.

L'expérience ainsi faite montre que l'on peut, par ce procédé, modifier le timbre du son fondamental perçu par l'oreille. « L'appareil permet, dit M. Helmholtz, de reproduire à volonté soit les voyelles de la voix humaine, soit les différents registres de l'orgue, pourvu qu'ils ne présentent pas d'harmoniques trop aigus : il manque cependant, aux sons de l'orgue ainsi imités, le bruit sifflant que donne le courant d'air en se brisant contre les lèvres du tuyau. On peut encore reproduire le nasillement de la clarinette, au moyen d'une série d'harmoniques impairs, et le son doux du cor, au moyen du chœur complet des diapasons. »

458. Phonographe. — Nous dirons maintenant quelques mots d'un instrument qui a été imaginé en Amérique, par M. Edison, et qui permet de reproduire, au bout d'un temps quelconque, les sons musicaux ou les paroles qu'on a prononcées dans son voisinage.

Le phonographe (fig. 296) se compose d'un cylindre métallique C, mobile autour d'un axe AA'. L'une des parties A' de cet axe présente un pas de vis, qui passe dans un écrou creusé dans le support S' : lorsqu'on tourne la manivelle M, le cylindre éprouve un déplacement progressif dans le sens de son axe, en même temps qu'il tourne autour de cet axe lui-même. Sur la surface du cylindre est creusée une rainure en

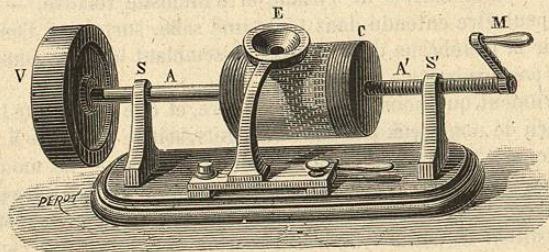


Fig. 296. — Phonographe de M. Edison.

forme d'hélice, dont le pas est le même que celui de la vis taillée sur l'axe : le cylindre est enveloppé par une feuille mince de papier d'étain, qui s'applique sur les bords saillants de la rainure, sans pénétrer dans les parties creuses. — Sur le côté du cylindre est disposée, sur un support fixe, une embouchure E, au fond de laquelle est une membrane métallique très mince m (fig. 297). Sous la membrane, est un petit style métallique très court, fixé à l'extrémité d'un ressort a : la membrane presse légèrement sur ce ressort, par l'intermédiaire de deux petites pièces de caoutchouc.

Avant de commencer l'expérience, on place le support de la membrane de manière que la pointe du style corresponde à l'un des points où la feuille d'étain passe au-dessus de la cavité de la rainure. — Puis on fait tourner le cylindre, d'un mouvement aussi uniforme que possible, et l'on émet, à haute voix, les paroles ou le chant que l'on veut faire reproduire par l'appareil. Chacune des impulsions communiquées par l'air à la membrane refoule le style, qui imprime à la feuille d'étain une sorte de gaufrage, plus ou moins profond, selon l'amplitude de l'impulsion elle-même. Il en résulte, sur cette feuille, un sillon hélicoïdal discontinu, formé par de petites dépressions dont les distances relatives dépendent de la hauteur du son, et dont la profondeur dépend de l'intensité du son. — Pour faire répéter à l'appareil la phrase ou le chant qui lui a été confié, on écarte d'abord le support qui porte la membrane et le style, et l'on ramène le cylindre

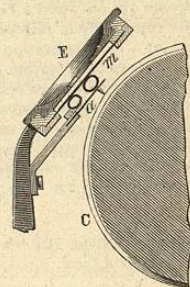


Fig. 297.

en arrière, jusqu'à sa position primitive; enfin, on rapproche le support, de manière que toutes les pièces se retrouvent dans leur position initiale. Le cylindre étant alors remis en mouvement avec la même vitesse que précédemment, le style, commandé maintenant par les dépressions ou les saillies de la feuille d'étain, communique successivement à la membrane toutes les impulsions qu'il en avait reçues, avec toutes les particularités de rythme et d'intensité relative. — Le son produit peut être entendu dans toute une salle, surtout si l'on a soin de munir la membrane d'un cornet, rassemblant les sons comme une sorte de porte-voix (*).

L'instrument que nous venons de décrire, et que représente la figure 296, a reçu de nombreux perfectionnements, soit de la part de M. Edison lui-même, soit de la part de divers constructeurs. — Le mouvement du cylindre peut être commandé par un moteur électrique qui en assure la régularité. — Au cylindre métallique couvert d'une feuille d'étain, on peut substituer de petits cylindres de carton, couverts d'une couche de cire ou d'une autre substance analogue, suffisamment résistante pour conserver les empreintes. — Ces cylindres, de dimensions uniformes peuvent ensuite être expédiés d'un lieu à un autre; en les replaçant alors sur un autre appareil semblable, on arrive ainsi à faire entendre, en un lieu quelconque, les phrases ou les airs de musique qui leur ont été confiés.

(*) L'intensité absolue des sons rendus par l'appareil est beaucoup moindre que celle des sons qui ont servi à l'impressionner. C'est ce qu'on s'explique sans peine, si l'on tient compte de la faiblesse des amplitudes des vibrations de la membrane.

Quant à la conservation du rapport des hauteurs des sons, elle exige expressément que la vitesse de rotation du cylindre reste absolument constante. C'est pour assurer, autant que possible, ce résultat, qu'on place sur l'axe un lourd volant V. — Pour la reproduction de phrases parlées, les inégalités de vitesse ont seulement pour conséquence de faire monter ou baisser légèrement la voix. Pour la reproduction des sons musicaux, on conçoit que l'inconvénient est beaucoup plus grave, les variations de hauteur des sons successifs arrivant à produire des dissonances extrêmement désagréables.

LIVRE QUATRIÈME

OPTIQUE

CHAPITRE PREMIER

PROPAGATION DE LA LUMIÈRE. — PHOTOMÉTRIE.

I. — PROPAGATION DE LA LUMIÈRE.

459. Sources de lumière. — Corps lumineux. — Certains corps ont, par eux-mêmes, un éclat qui nous les rend visibles sans l'intervention d'aucune lumière étrangère. Tels sont le soleil, les étoiles, les flammes de nos lampes, le charbon incandescent, etc. — Ce sont des *sources lumineuses*.

Au contraire, la plupart des corps qui nous entourent ne deviennent visibles qu'à la condition d'être *éclairés*, c'est-à-dire de recevoir d'une source la lumière qu'ils renvoient à notre œil.

Pour ce qui concerne les phénomènes que nous avons à étudier, il n'existe aucune différence entre la lumière émise directement par les sources lumineuses, et celle qui est renvoyée par les corps éclairés. Nous désignerons donc sous le nom de *corps lumineux* tous les corps qui sont visibles à notre œil, soit par eux-mêmes, soit sous l'influence d'une lumière étrangère.

460. Corps transparents et corps opaques. — On appelle *corps transparents*, ceux que la lumière peut traverser. — L'air, le verre sont des corps transparents : ils laissent arriver jusqu'à nous la lumière du soleil ou celle des corps lumineux en général.

On appelle *corps opaques*, ceux que la lumière ne peut pas traverser : tels sont le bois, la pierre, les métaux sous une épaisseur suffisante, etc.

461. Hypothèse de l'émission et hypothèse des ondulations. — Pour expliquer l'action que les corps lumineux exercent sur notre œil, deux hypothèses différentes ont été faites.

L'*hypothèse de l'émission*, due à Newton, suppose que les corps lumineux envoient, dans toutes les directions, des particules d'une substance ténue, impondérable, capable de traverser les corps transpa-