LE SON.

PARIS. — IMPRIMERIE DE GAUTHIER-VILLARS,
Rue de Seine-Saint-Germain, 10, près l'Institut.

LE SON,

PAR

JOHN TYNDALL, LL.D. F.R.S.

PROFESSEUR DE PHILOSOPHIE NATURELLE
A L'INSTITUTION ROYALE ET A L'ÉCOLE ROYALE DES MINES DE LA GRANDE-BRETAGNE.

COURS EXPÉRIMENTAL FAIT A L'INSTITUTION ROYALE.

TRADUIT DE L'ANGLAIS

PAR M. L'ABBÉ MOIGNO.

PARIS,
GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE IMPÉRIALE POLYTECHNIQUE,
SUCCESSEUR DE MALLET-BACHELIER,
Quai des Augustins, 55.

—

1869

0472

19 742 994

PRÉFACE DE L'AUTEUR

Dans les pages qui suivent j'ai essayé de rendre la science de l'acoustique accessible à toutes les personnes intelligentes, en y comprenant celles qui n'ont reçu aucune instruction scientifique particulière.

J'ai traité mon sujet d'une manière tout à fait expérimentale, et j'ai cherché à placer tellement chaque expérience sous les yeux et dans la main du lecteur, qu'il puisse la réaliser lui-même ou la répéter. Mon désir et mon but ont été de laisser dans les esprits des images si nettes des divers phénomènes de l'acoustique qu'ils les saisissent et les voient dans leurs rapports réels.

J'ai à remercier quelques-uns de mes amis d'Angleterre d'avoir eu la bonté de lire plus ou moins complétement les épreuves de cet ouvrage. Mais je dois une reconnaissance toute particulière à l'un de mes illustres amis d'Allemagne (M. Clausius) qui s'est donné la peine de revoir ces mêmes épreuves du commencement à la fin.

On voit grandir avec bonheur sur toute la surface du monde civilisé le désir d'une instruction scientifique plus sérieuse. Ce sentiment est tout naturel, il est même inévitable dans les circonstances présentes. Car une puissance qui a une si grande influence sur les destinées intellectuelles et matérielles de notre époque ne pouvait pas manquer de fixer l'attention et de commander l'examen. On voit naître au sein de nos écoles et de nos universités, en faveur de la science, un mouvement qui aura sans doute pour résultat la reconnaissance authentique de ses droits, comme principe à la fois de connaissances et de développement intellectuel. Si en plaçant, quoique d'une manière incomplète, les principaux traits et la physionomie des sciences physiques sous les yeux des hommes influents qui ont puisé leur instruction à une autre source, ce livre peut aider indirectement ceux qui sont engagés dans le mouvement auquel je faisais tout à l'heure allusion, il n'aura pas été écrit en vain.

La traduction française de cet ouvrage a été faite par M. l'abbé Moigno avec son habileté accoutumée. Quoique je n'aie pas la bonne fortune de partager dans toutes leurs particularités les vues de mon savant traducteur, je ne lui en dois pas moins mes remercîments pour son intéressante préface et le précieux appendice qu'il a ajouté à cet ouvrage.

Je dois remercier aussi M. Gauthier-Villars des soins très-distingués qu'il a apportés à l'impression de mon livre. En réalité, au point de vue de la typographie, la traduction, dans mon opinion, surpasse l'original.

John TYNDALL.

Londres, ce 20 novembre 1868.

PRÉFACE DU TRADUCTEUR

La traduction du livre de M. Tyndall a été laborieuse ; elle présentait des difficultés particulières, en raison peut-être de la perfection du texte anglais. Je crois les avoir vaincues, et je me sens déjà tout récompensé d'une fatigue de quelques mois, autant par le mérite intrinsèque de ce traité élémentaire d'acoustique, que par les services qu'il est appelé à rendre. Il est parfait au point de vue expérimental ; il serait, en effet, impossible de mieux choisir, de mieux décrire, de mieux exécuter les expériences nécessaires à la manifestation des faits et à la détermination des lois qui les régissent. Il sera donc lu avec un vif intérêt non-seulement par les professeurs, mais par tous les amis de la science claire et pratique.

M. Tyndall a parfaitement fait ce qu'il a voulu faire ; sous ce rapport, je ne vois rien à perfectionner dans son œuvre ; mais peut-être que quelques remarques historiques, techniques et philosophiques la rendront un peu plus intéressante encore aux nombreux lecteurs qu'elle est assurée de trouver en France. Qu'il me permette de les présenter ici sans prétention aucune.

Il y a vingt ans à peine, la science du son, cependant si attrayante, si utile, ou même si nécessaire, était presque ignorée en France ; elle n'avait dans l'enseignement qu'une part infiniment petite. Dans les cabinets de physique les mieux montés et les plus célèbres, on trouvait, en fait d'instruments d'acoustique : une clochette ou plutôt un mouvement d'horlogerie mal combiné pour l'expérience du son dans le vide; un sonomètre rudimentaire; un sommier avec quelques tuyaux mal assortis, en bois ou en carton, de formes et de dimensions complétement arbitraires; quelques petites plaques vibrantes en verre; rien de plus. Aucune des lois, à part celle des cordes vibrantes, ne pouvait être démontrée, et presque tous les phénomènes acoustiques de la nature, de l'expérience et de l'art restaient complétement ignorés. Même pour la vitesse du son dans l'air, on en était réduit à accepter de confiance les expériences de Montlhéry, sans pouvoir les confirmer sur place, tandis qu'aujourd'hui nous mesurons rigoureusement cette vitesse de mille manières, dans nos cabinets de physique.

Heureusement Félix Savart, d'abord chirurgien des armées, puis médecin praticien à Strasbourg, musicien assez habile, se prit, vers 1820, d'une belle passion pour l'acoustique. Il l'étudia d'une manière approfondie, après que, sur sa demande, il eut été nommé préparateur de physique et conservateur des collections au Collége de France; et il l'enseigna avec un très-grand succès de 1836 à 1842, dès qu'il eut succédé à Ampère dans la chaire de physique de ce même Collége de France. Lié avec lui, je suivis assidûment ses cours; je rédigeai même avec un très-grand soin ses leçons, publiées plus tard par M. Masson, professeur de physique au lycée Louis-le-Grand, dans le journal l'*Institut*. Je pourrais ajouter qu'avec M. le docteur Guérard, j'étais l'élève le plus sympathique et le plus fidèle de Savart. Son enseignement était vraiment remarquable. Il mettait quelquefois plusieurs jours à préparer une leçon; il multipliait les expériences et les exécutait avec une habileté prodigieuse; il analysait les phénomènes avec une supériorité incontestable, etc.; mais il manquait d'une science suffisante pour en faire la synthèse et la théorie; il n'était pas assez initié à la physique générale et ne savait pas les mathématiques. Aussi les explications théoriques de ses plus beaux mémoires sont-elles aujourd'hui contredites ou révoquées en doute; il ne reste guère de lui, comme le livre de M. Tyndall le fera peut-être trop sentir, que plusieurs expériences brillantes.

Quoi qu'il en soit, de 1836 à 1840, l'enseignement de l'acoustique fut aussi avancé au Collége de France qu'à Göttingue et à Heidelberg. Mais il n'avait pas pénétré dans les facultés, les lycées et les colléges, et un progrès considérable restait à réaliser : on me permettra de dire comment j'en fus l'instrument. Je rencontrais sans cesse au cours de Savart un homme très-aimable, très-avide d'apprendre et d'enseigner, M. Marloye, constructeur d'instruments de mathématiques en bois et de modèles de cristaux. Il aidait Savart à préparer ses leçons, et avec tant d'ardeur, qu'il négligeait peut-être un peu trop son industrie et ses propres intérêts. La pensée me vint de lui commander, pour le cabinet de physique de l'école normale ecclésiastique que je dirigeais rue du Regard, n° 13, une collection complète des principaux appareils de démonstration de Savart : mes supérieurs m'avaient permis de consacrer à cette acquisition une somme assez considérable, trois ou quatre mille francs. Je fus bien récompensé de mon initiative en me trouvant tout à coup en mesure de répéter les belles expériences que j'avais tant admirées au Collége de France, et que j'ai énumérées rapidement, en 1842, dans la *Revue scientifique et industrielle* de M. le docteur Quesneville, tome VIII, page 83. J'avais : un banc complet de roues dentées pour la production des sons musicaux par le choc, pour la mesure du nombre des vibrations des notes de la gamme et la fixation approchée de la limite des sons aigus; un banc, avec la barre de Savart, pour la fixation de la limite des sons graves; des séries complètes de tuyaux pour mettre en évidence les lois de leurs vibrations, l'état de l'air dans leur sein, la position des nœuds et des ventres, l'influence des parois, etc; des assortiments de cordes, de verges, de lames, de plaques, de membranes, parfaitement choisis et combinés, de manière à faire ressortir les lois de leurs vibrations, les phénomènes de transmission du mouvement et de réaction des milieux, etc. Ces expériences, toujours prêtes à être répétées, excitèrent au plus haut degré l'attention des nombreux visiteurs de ce cabinet de physique modèle, où l'acoustique, autrefois inconnue, devint la science à la mode, au point de faire oublier un instant ses sœurs privilégiées, les sciences de la lumière, de la chaleur et de l'électricité. Mon exemple allait être imité, lorsque, par suite d'un mécontentement imprévu, et sans cause légitime, M. Marloye se vit tout à coup repoussé par Savart, après dix longues années d'intimité[1].

[1] En révélant la cause de cette rupture douloureuse, je rappellerai un fait d'acoustique important. M. Marloye ne croyait pas que les chocs de la barre contre l'air fussent un moyen rigoureux de fixer la limite des sons graves, parce qu'on ne tenait pas compte de l'influence de la masse d'air environnante. La barre, dans l'instrument de Savart, passait entre deux planches suffisamment rapprochées à la surface supérieure du banc; il dressa deux planches semblables au-dessous, et constata que le son, à nombres égaux de tours de barre, montait notablement. Il prit ensuite une simple crécelle en bois, lui adapta une petite planchette que l'on pouvait écarter ou rapprocher de manière à ouvrir ou fermer le fond de la crécelle, et s'aperçut que le son passait du ton fondamental à la quinte, quand la crécelle devenait d'ouverte fermée. Comment faire accepter cette expérience décisive? Je mis le petit instrument dans ma poche; j'allai chez Savart, et feignant un moment de distraction, je fis tourner la crécelle tour à tour ouverte et fermée.

Ce que je viens de dire se rattache à un point important de la science de l'acoustique. Pour déterminer la limite des sons graves, il faut se servir des sons simples; si le son, en effet, est accompagné d'harmoniques, l'oreille n'entendra que ces harmoniques, parce que sa sensibilité diminue à mesure que l'on descend dans l'échelle des sons. Savart était au comble de sa gloire et de sa puissance; il cessa de recommander son vieil ami, il le contrecarra même, et le mouvement que j'avais eu tant de peine à faire naître s'arrêta quelque peu. Il reprit après la mort du maître; M. Marloye eut quelques commandes, et, grâce à lui, l'acoustique tendit à se généraliser; mais il se fatiguait, et bientôt il dut songer à la retraite, sans avoir pu se donner un successeur de son choix.

Quelques années après, au moment où je cherchais partout le remplaçant de M. Marloye, un jeune allemand, M. Rodolphe Kœnig, fut tout à coup saisi à son tour d'une belle passion pour l'acoustique. Il se construisit un petit atelier; et son ardeur fut si grande, sa persévérance si opiniâtre, qu'on le vit grandir rapidement sans avoir été patroné par personne, jusqu'au point de prendre dans l'Europe entière une position aujourd'hui sans rivale. Il est vrai qu'à la célèbre école de Kœnigsberg, laquelle, reconnaissante, vient de lui conférer le titre de docteur en philosophie, il avait fait d'excellentes études; que son oreille est très-exercée et sa main grandement habile; que les ouvrages de Helmholtz et les mémoires des savants phy-

Savart comprit; mais il ne revit plus M. Marloye. Il est trop vrai, hélas! que les promoteurs les plus ardents du progrès finissent par en devenir les adversaires les plus acharnés, parce qu'ils s'imaginent qu'incarné en eux, il ne peut plus être réalisé par d'autres que par eux. Que d'exemples de cette douloureuse vérité je pourrais exhumer de ma longue vie scientifique!

siciens de l'Allemagne n'ont pour lui rien de mystérieux.

Un mot maintenant de la philosophie de cette belle science des sons. Il est bien convenu aujourd'hui qu'il faut distinguer dans les corps trois sortes de parties : les particules, les molécules et les atomes. Nous les avons nettement définies dans les opuscules de la *Combinaison des atomes* et de la *Physique moléculaire.* La particule est une petite partie du corps ; la molécule est l'élément essentiel ou constituant du corps, ce qui est tel que quand on l'a on a le corps, que lorsqu'on n'en a qu'une partie on n'a plus le corps; l'atome est le dernier élément du corps, l'élément constituant de la molécule. La molécule est composée d'atomes toujours identiques à eux-mêmes, en tel ou tel nombre, disposés de telle ou telle manière, etc. La particule est une petite portion du corps comprenant un nombre toujours considérable de molécules. Le son certainement n'est pas un phénomène particulaire ; il n'est pas non plus un phénomène atomique comme la lumière ou la chaleur; c'est donc un phénomène moléculaire. Mais comment le démontrer? Ni Chladni, ni M. Wheatstone, ni M. Helmholtz, ni M. Tyndall n'ont cherché à le faire. La question cependant est digne d'un sérieux examen. Si le son est un phénomène moléculaire, son intensité pour un même corps, formé des mêmes molécules, doit être proportionnelle au nombre des molécules en vibration[1]. Il faudrait donc prendre des corps de formes semblables, variant seulement par les dimensions, les faire vibrer au maximum, mesurer les intensités des sons rendus, et voir dans quel rapport elles

[1] C'est sur ce point principalement que M. Tyndall fait ses réserves, et me laisse à ma propre responsabilité. La question est en effet très-délicate et c'est pour cela que je la soulève. Je n'ignore pas que les dimensions du corps sonore influent non-seulement sur l'intensité, mais sur le ton de son; il y a là certainement un mystère à approfondir.

F. M.

sont avec les nombres de molécules des corps. Malheureusement les vibrations des corps semblables ont été très-peu étudiées, même au point de vue de leurs nombres ou de leurs vitesses de vibrations. On ne sait presque rien des intensités des sons rendus par les solides semblables. Il y a plus, et c'est dans l'acoustique un vide énorme qu'il faut s'efforcer de remplir à tout prix ; on n'a pas encore appris à mesurer l'intensité des sons. La science est en possession de thermomètres, de photomètres, d'électromètres, de magnétomètres, de galvanomètres, de dynamomètres, servant à mesurer les intensités de la chaleur, de la lumière, etc., et nous sommes encore sans aucun phonomètre proprement dit, car le nom de phonomètre appartient de droit à l'appareil qui mesurera les intensités du son. Je dirai bientôt quelle voie on pourrait suivre pour combler cette lacune si regrettable ; il me suffit ici d'avoir posé le problème important du siége du son.

M. Tyndall a bien énoncé le principe d'Euler que la consonnance est la sensation agréable résultant de la perception de l'ordre sans fatigue de l'esprit, d'où Euler concluait que les sons consonnants sont uniquement ceux dont les nombres de vibrations sont exprimés par des chiffres très-simples. Mais, et je regrette qu'il ne l'ait pas dit, Euler avait démontré, en outre, que toutes les notes de la gamme ont leur raison d'être dans les trois nombres 2, 3, 5 ; en ce sens que leurs nombres de vibrations sont des multiples simples de 2, 3, 5 ; des multiples dans lesquels 3 entre comme facteur au plus trois fois, et 5 au plus deux fois. Euler expliquait l'impossibilité d'introduire, comme facteurs, 3 plus de trois fois, 5 plus de deux fois, ou un autre nombre premier quelconque, 7, 11, etc., par l'organisation propre de l'oreille, dont la puissance, dans la perception des consonnances, serait comme limitée à la perception des trois premiers nombres. Je suis allé ailleurs plus loin : j'ai admis que dans la constitution intime des corps, comme dans la formation des sons de la gamme, comme dans les phénomènes perçus par la vue, les formes, les dimensions des objets, les couleurs, etc., les seuls nombres admissibles, les seuls nombres de la nature qui soient en rapport harmonique avec nos sens, sont les nombres 2, 3, 5. J'aime assez, je l'avoue, la théorie qui expliquait les consonnances par les coïncidences des pulsations à intervalles réguliers et très-courts, et elle me paraît conserver encore, sur la théorie de Helmholtz ou des battements, l'avantage de la généralisation. Quand notre œil est charmé par les proportions harmonieuses d'un objet quelconque, que nous réduirons pour simplifier à une fenêtre, nous trouvons toujours que le rapport de la hauteur à la largeur est exprimé par des nombres très-simples, comme dans le cas de la consonnance musicale; tandis que si la vue de la fenêtre fatigue le regard, ce même rapport sera exprimé par des nombres complexes. Le principe de la perception de l'ordre sans fatigue trouve ici son application toute faite ; mais où chercher cette fois quelque chose d'analogue aux battements dissonants? Je ne le vois pas, et c'est une difficulté dont je demande la solution aux maîtres de la science.

Un mot maintenant des membranes dont il a été à peine question dans les leçons. La qualité la plus précieuse des membranes est de pouvoir être placées dans des conditions telles qu'elles vibrent à l'unisson de tous les sons. Sans membranes il aurait été absolument impossible de construire le phonautographe, charmant appareil inventé par M. Léon Scott, perfectionné par M. Kœnig, qui donne les tracés des mouvements vibratoires les plus complexes des corps solides et gazeux. Sans les membranes, M. Kœnig n'aurait pas pu combiner ses capsules à flammes manométriques qui rendent si nettement visibles les compressions et dilatations de l'air aux nœuds de vibration. Les membranes, en outre, sont appelées à remplacer l'oreille dans une multitude de circonstances, et je suis heureux de pouvoir rappeler ici une classe de phénomènes trop oubliés. Je veux parler de l'analyse des sons par la réflexion, d'après la méthode de Nicolas Savart, frère de Félix. Au milieu d'une plaine dégarnie de tout autre objet capable de réfléchir le son, il élevait une paroi plane verticale, et disposait en face de cette paroi, à quinze ou vingt mètres de distance, un corps qui mis en vibration produisait un son continu et d'une intensité constante. Un observateur se plaçait entre le corps sonnant et la paroi, de telle manière que la droite passant par les deux conduits auriculaires se confondît avec l'axe de réflexion. Dans cette position il bouchait l'oreille droite dirigée vers l'origine des ondes sonores, puis il cherchait, avec l'oreille gauche restée ouverte, les points dans lesquels l'intensité du son devenait nulle ou atteignait son maximum, c'est-à-dire les nœuds et les ventres. L'immobilité de ces points remarquables des ondes permettait d'en fixer la position sur l'axe de réflexion ; et l'on constatait, en mesurant la longueur des ondes réfléchies : 1° qu'elle était égale à celle des ondes directes ; 2° qu'il existait autant de systèmes d'ondes, que le corps vibrant avait d'harmoniques, ou, s'il s'agissait d'un bruit, que ce bruit avait de sons simultanés composants. On arrivait de cette manière à analyser un son ou un bruit, à reconnaître son degré plus ou moins grand de pureté, à assigner enfin les causes du timbre qui le caractérise. M. N. Savart, dont l'oreille après un certain exercice était parvenue à distinguer au milieu du bruit les sons produits par la réflexion, pouvait isoler sans peine les uns des autres les sons multiples des bruits d'une voiture, d'une chute d'eau, de la vapeur s'échappant de la chaudière, d'un roulement de tambours, des feuilles des arbres agitées par le vent, d'une grande ville, de la mer, etc. Mais il constata en même temps une particularité singulière : la première onde réfléchie, celle qui est en contact avec la paroi réfléchissante, était plus courte de moitié que les autres, ou que l'onde directe, quand il s'agissait d'un son simple. Il y avait donc là une perte d'une demi-onde qui intrigua grandement les physiciens, et dont Seebeck fils donna le premier une explication que je me fais un devoir de rappeler. Dans la position où se plaçait Savart, le son réfléchi arrivait directement à l'oreille dans sa direction propre, tandis que le son direct, obligé de s'infléchir et de tourner la tête, arrivait dans une direction contraire à sa direction primitive. Or, dans cette inflexion du rayon, les vibrations moléculaires changeaient elles-mêmes de direction ; elles allaient d'abord du corps sonore à la surface réfléchissante, elles revenaient ensuite de la surface réfléchissante au corps sonore. Dès lors, nécessairement, M. Savart avait perçu les nœuds là où étaient en réalité les ventres, et les ventres là où étaient les nœuds. En tenant compte de cette remarque si simple, l'anomalie disparaissait, et il n'y avait plus de demi-onde perdue. En effet, Seebeck fils substitua à la tête, qui devenait un obstacle embarrassant, une petite membrane verticale formée d'une peau très-fine de cygne, ou d'une feuille mince de caoutchouc tendue sur un anneau de bois; il suspendit parallèlement à la surface de la membrane un petit pendule formé d'un simple fil de cocon, et d'un fragment arrondi de gomme laque correspondant au centre de la membrane; il procéda ensuite à l'expérience et constata: 1° que le pendule restait en repos, indiquant un nœud, lorsque la membrane se trouvait à des distances égales à 1, 2, 3 longueurs d'onde; 2° qu'il s'agitait de plus en plus à mesure que l'on s'éloignait plus des nœuds, arrivait à son maximum d'amplitude, et annonçait la présence des ventres à des distances égales à 1/2, 3/2, 5/2, etc., longueurs d'onde. Le mystère avait cessé, l'ordre était rétabli. La membrane remplaçait donc l'oreille avec de très-grands avantages, je demandais qu'on ne l'oubliât jamais, M. Regnault s'en est souvenu dans ses expériences sur la vitesse du son.

Cela posé, je reviens à mes moutons. Le petit appareil à membrane et à pendule de Seebeck fils, dont j'ai tant admiré les belles expériences à Dresde, en 1845, ne pourrait-il devenir un intensimètre du son? S'il le voulait bien, M. Kœnig ne pourrait-il pas le disposer de telle sorte qu'on pût mesurer rigoureusement ses écarts? Consulté par moi, M. Kœnig a répondu qu'il n'avait pas foi dans les membranes! Pour lui comme pour M. Radau, le *Phonomètre*, jusqu'ici du moins, ne peut être qu'un instrument donnant des sons d'une force toujours la même au moyen d'une soufflerie à pression constante. On chercherait la distance à laquelle le son du phonomètre paraîtrait aussi fort que celui dont on aurait à déterminer l'intensité. Cette intensité, alors, serait à celle du son type dans le rapport inverse du carré de la distance du phonomètre à la source sonore. (L'*Acoustique* ou les *Phénomènes du son*, par R. Radau [1].)

Il est presque certain aussi que les membranes jouent un rôle important dans l'organe de la voix, et je rappellerai à cette occasion une expérience curieuse de M. Isoard. Il prenait un tube en cuivre de 2 ou 3 centimètres de diamètre, de 3 ou 4 centimètres de longueur, il le fermait à l'une de ses extrémités par une membrane de caoutchouc bien mince et bien tendue, et le faisait résonner au moyen d'une embouchure composée d'un petit porte-vent qui projetait l'air contre le tranchant d'une demi-surface plane circulaire fermant à moitié la seconde extrémité du tube. Le tube en parlant rendait un son plus grave d'une quinte, ou même d'un octave entier, que celui qui, dans la théorie de Bernouilli, répondrait à sa longueur. De plus, si, avec la tête d'une épingle, on touchait la membrane successivement en plusieurs de ses points, on pouvait hausser ou baisser le son à volonté, et jouer même des airs très-variés. Un tube dont une des parois est une membrane flexible n'est donc plus soumis aux lois mathématiques des tuyaux ordinaires; il peut, sans changer de longueur, rendre des sons très-différents, aigus ou graves. Le secret de la voix humaine ne serait-il pas là? On comprendrait plus facilement que le larynx si court de certains oiseaux puisse produire des sons peu élevés dans l'échelle musicale, et que l'étendue de leur voix soit si grande. Le tube d'Isoard rappelle l'instrument primitif appelé guimbarde, qui met si parfaitement en évidence l'influence énorme de la forme et des dimensions de la cavité de la bouche sur l'intensité et

[1] Paris, Hachette, 1867, page 68.

le son des cordes vocales, influence que les deux faits auxquels il est fait allusion dans le texte ne font pas assez ressortir. C'est encore là une qualité des membranes, objet des études récentes de quelques physiciens et mathématiciens modernes, MM. Félix Bernard, Bourget, Mathieu, qui sont parvenus à établir mathématiquement les lois de leurs vibrations et à les vérifier par l'expérience.

Notre célèbre mathématicien M. Duhamel a bien mérité de la science des sons, en l'enrichissant de théories et d'expériences remarquables que nous ne devons pas passer sous silence. Citons au moins quelques faits curieux. L'analyse l'avait conduit à ce résultat imprévu, immédiatement confirmé par l'expérience, que si l'archet, animé d'une vitesse toujours supérieure à celle de la corde, continue à se mouvoir indéfiniment, la corde finira par s'arrêter dans la position d'équilibre autour de laquelle elle oscille, et le son finira par s'éteindre. En outre, la corde dont la vitesse est devenue égale ou supérieure à celle de l'archet peut faire entendre un son plus grave, même d'une quinte, que le son fondamental : en étudiant à l'aide de l'analyse le mouvement absolu de chacun des points d'une corde ou d'une plaque mise en mouvement par la réunion des causes qui produiraient séparément un nombre quelconque de sons, il trouva et constata par l'expérience que la corde pouvait être considérée comme partagée en parties inégales dont les grandeurs dépendent des rapports des causes données, et telles que tous les points d'une même partie exécutent le même nombre de vibrations dans le même temps. Il en résulte que lorsqu'une corde ou surface vibrante fait entendre à la fois plusieurs des sons qu'elle pourrait produire isolément, elle se partage en un nombre limité de parties dans chacune desquelles règne un des sons entendus. M. Duhamel a découvert aussi analytiquement et constaté expérimentalement la loi suivante des vibrations d'une corde flexible chargée de curseurs : si l'on suppose la même corde chargée successivement au même point de masses différentes, le son fondamental et les divers harmoniques s'élèvent dans des proportions complétement fixées à l'avance, et dépendantes des racines d'une équation algébrique ou transcendante.

Il est une question sur laquelle je tiens à appeler encore l'attention : l'influence mutuelle des vibrations excitées en divers points de l'espace. Savart avait pris deux roues dentées d'un même nombre de dents, il les avait accolées l'une à l'autre, mais de telle sorte que les pleins de l'une correspondissent exactement aux vides de l'autre, et il avait constaté en les faisant tourner simultanément que le son rendu par la carte qui recevait les chocs des dents était non pas l'octave du son rendu par la rotation de chaque roue, comme il semblait que cela dût être, mais le son même de chaque roue. Ce fait s'explique par ces deux circonstances : 1° le son rendu par une roue dentée dépend non pas proprement ou directement du nombre de ses dents, mais de la grandeur de l'intervalle entre deux dents, puisque le son ne change pas quand on enlève successivement à la roue la plus grande partie de ses dents pour ne plus lui en laisser que deux ; 2° lorsqu'une carte est placée sur la route des dents de deux roues de même nombre de dents, les deux petites parties frappées vibrent indépendamment, rendant le son déterminé par l'intervalle de deux dents, ce sont donc deux sons identiques qui s'ajoutent, et non des vibrations séparées qui se combinent pour former l'octave. Cependant on constate avec la sirène à disques de Seebeck, tant perfectionnée par M. Kœnig, que les pulsations nées de deux séries d'orifices en nombres égaux se combinent pour former l'octave. Il y a là matière à une discussion intéressante et à des expériences curieuses. Ce que M. Tyndall dit de l'élévation du ton quand le corps sonore s'approche, de son abaissement quand il s'éloigne, aurait aussi besoin d'explications que je voudrais bien donner. Il me semble qu'on oublie trop que le ton du son est déterminé par le nombre des vibrations et non par le nombre des ondes qui arrivent à l'oreille en une seconde. Mais il est temps de finir; je renvoie à un *Appendice* placé à la fin du volume l'énumération rapide des faits et des instruments que je crois utile d'ajouter à ceux que M. Tyndall a si bien démontrés et décrits.

Ces quelques pages le prouveront, je l'espère, les questions d'acoustique m'ont longtemps occupé, et j'étais par conséquent bien préparé pour la traduction que je devais entreprendre un jour d'un livre auquel je suis heureux d'avoir attaché mon nom.

M. Auguste Guiot, docteur ès-sciences mathématiques, m'a aidé dans mon travail; je le prie d'agréer mes remercîments sincères.

F. Moigno.

TABLE SOMMAIRE

LEÇON III, p. 90.

LEÇON IV, p. 132.

LEÇON V, p. 166.

LEÇON VI, p. 231.

LEÇON VII, p. 274.

LEÇON VIII, p. 308.

ERRATUM

Page 13, ligne 16. Au lieu de *voisine*, lisez *éloignée*.

— 29, — 4. Au lieu de *n'existe que dans l'intervalle très-court*, lisez *n'existe que quand l'intervalle entre l'éclair et le bruit du tonnerre est très-court*.

— 34, — 3. Au lieu de *la molécule* o'', lisez *la molécule* b''.

— 42, — 32. Au lieu de *l'élasticité à densité égale est plus grande que dans les liquides*, lisez *le rapport de l'élasticité à la densité est plus grand que dans les liquides*.

— 48, — 28. Au lieu de *diminue comme le carré de la distance*, lisez *diminue en raison inverse du carré de la distance*.

— 64, — 25. Au lieu de *est proportionnelle à l'amplitude*, lisez *diminue avec l'amplitude*.

— 82, — 15. *A manivelle E*, ajoutez *(fig. 23)*.

— 82, — 21. Au lieu de *coïncider avec*, lisez *à aller au devant*.

LE SON

PREMIÈRE LEÇON

Les nerfs et les sensations. — Production et propagation du mouvement sonore. — Expérience sur les corps placés dans le vide. — Action de l'hydrogène sur la voix. — Propagation du son dans un air de densité variable. — Réflexion du son. — Échos. — Réfraction du son. — Inflexion du son ; cas particulier du village et de l'église d'Erith. — Influence de la température sur la vitesse du son. — Influences de la densité et de l'élasticité. — Calcul de la vitesse du son, par Newton. — Changements de température produits par l'onde sonore. — Correction de la formule de Newton par Laplace. — Rapport des chaleurs spécifiques à pression constante et à volume constant, déduit des deux vitesses du son. — Équivalent mécanique de la chaleur déduit de ce même rapport. — Conclusion que l'air atmosphérique n'a pas un pouvoir sensible de rayonnement calorifique. — Vitesse du son dans différents gaz. — Vitesse du son dans les liquides et les solides. — Influence de la structure moléculaire sur la vitesse du son.

Les différents nerfs du corps humain ont leur origine dans le cerveau, et le cerveau est le siége de la sensation. Lorsque vous vous coupez un doigt, les nerfs aboutissant au doigt sont des messagers qui apportent immédiatement au cerveau la nouvelle de l'accident, et, si ces nerfs étaient coupés, quelque grave que fût la blessure, vous n'éprouveriez aucune douleur. On a les plus fortes raisons de penser que, dans tous les cas, ce qui est apporté au cerveau par les nerfs est du *mouvement*. C'est le mouvement excité par le sucre dans les nerfs du goût qui, transmis au cerveau, y produit la sensation de la saveur douce du sucre, tandis que l'amertume est le résultat d'un autre mouvement produit par l'aloès, par exemple. C'est le mouvement excité dans les nerfs olfactifs par les effluves d'une rose, qui s'annonce dans le cerveau comme le parfum de la rose. C'est le mouvement imprimé aux nerfs optiques par les rayons du soleil, qui éveille dans le cerveau la sensation de lumière ; tandis qu'un mouvement semblable, communiqué à d'autres nerfs, se traduit en chaleur dans ce merveilleux organe[1] de la perception.

Il ne s'agit pas ici d'un mouvement de translation du nerf, mais d'une vibration ou d'une sorte de frémissement des molécules ou particules infiniment petites dont il se compose.

Les différents nerfs sont appropriés à la transmission des différentes sortes de mouvements moléculaires. Les nerfs du goût, par exemple, ne sont pas aptes à transmettre les vibrations lumineuses, ni le nerf optique, à transmettre les vibrations sonores. Celles-ci exigent un nerf spécial, le *nerf auditif*, qui passe du cerveau dans une des cavités de l'oreille, où il se ramifie en une infinité de filaments. C'est le mouvement imprimé à ce nerf auditif qui, transmis au cerveau, se traduit par le son.

Nous avons aujourd'hui à considérer le mouvement sonore dans sa production et sa propagation. Approchons une flamme de ce petit ballon de collodion, plein d'un mélange d'oxygène et d'hydrogène ; le mélange gazeux fait explosion, et il n'est dans cette enceinte aucune oreille qui n'ait la conscience d'un choc, c'est-à-dire de cette impression qu'on nomme le son. Comment ce choc s'est-il transmis du petit ballon à vos oreilles ? Les gaz explosifs ont-ils lancé des molécules d'air jusqu'à vos nerfs acoustiques , comme une arme à feu lance une balle vers la cible ? Sans doute , dans le voisinage du ballon, il y a eu, entre certaines limites, une pro-

[1] Suivant Helmholtz et du Bois-Raymond, la vitesse avec laquelle se transmet une impression conduite par les nerfs est de 29 mètres par seconde.

pulsion de molécules; mais l'air qui choque l'air revient promptement au repos, et pas une des molécules d'air contiguës au ballon n'est allée frapper vos oreilles.

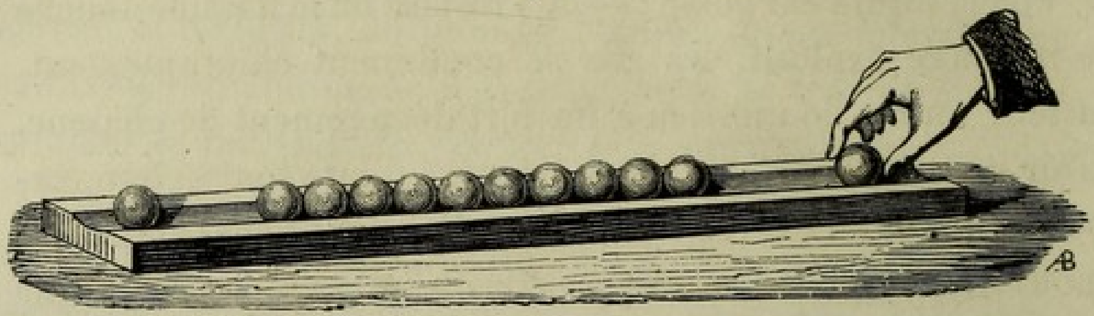
Voici ce qui s'est passé : — A l'instant où la flamme touche le mélange explosif, les gaz se combinent chimiquement, et leur union donne lieu à un fort dégagement de chaleur. L'air, à ce foyer intense de chaleur, se dilate tout à coup, repoussant violemment de tous côtés l'air qui l'environne. Ce mouvement de l'air très-rapproché du ballon se communique rapidement à l'air situé un peu plus loin, en même temps que l'air mis d'abord en mouvement revient au repos. L'air, à une petite distance, transmet lui-même son mouvement à de l'air situé à une plus grande distance et reprend son premier état de repos. C'est ainsi que chacune des couches d'air qui entourent le ballon reçoit le mouvement de la couche d'air qui la précédait et le transmet à la couche qui la suit, sous forme de vague ou d'onde, et que l'impulsion sonore se propage de proche en proche à travers l'air.

Dans un air à la température de la glace fondante, l'impulsion sonore avance avec une vitesse de 332 mètres par seconde.

Le déplacement de l'impulsion ne doit pas être confondu avec le déplacement des molécules qui la constituent à chaque instant; car, tandis que l'onde parcourt de grandes distances, les molécules d'air ne font que des excursions extrêmement limitées de va-et-vient.

La marche de l'onde peut être représentée par la transmission du mouvement à travers une rangée de billes de verre ou d'ivoire, comme celles dont on fait usage dans le jeu du *Solitaire*. On place (*fig.* 1) ces billes de verre dans une rainure, de manière que chacune soit en contact avec ses voisines. Prenant la dernière dans la main, on la lance contre l'avant-dernière bille de la file. Le mouvement de cette première bille se transmet à la seconde, laquelle le transmet à la troisième, celle-ci à la quatrième, et ainsi de suite,

Fig. 1.

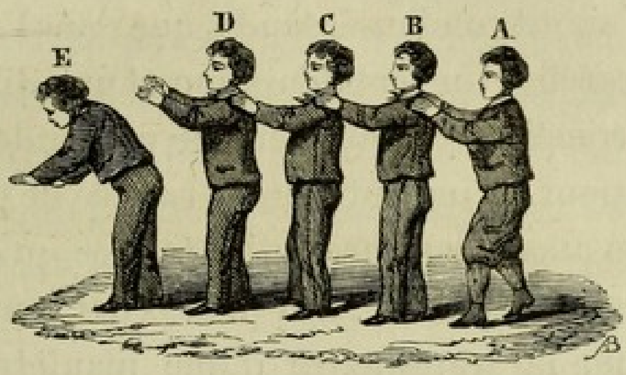


chaque bille revenant au repos après avoir cédé son mouvement à la suivante. La dernière bille de gauche seule se détache de la rangée, et s'éloigne. C'est précisément de cette manière que le son se propage de molécule à molécule à travers l'air. Les molécules qui remplissent la cavité de l'oreille reçoivent à leur tour le mouvement, et vont frapper la membrane du *tympan*, placée en travers du conduit qui aboutit au cerveau. Cette membrane, le *tambour* de l'oreille, est mise en vibration, le mouvement vibratoire se communique au nerf auditif, et, conduit le long de ce nerf, il arrive au cerveau, où il se traduit en son. Nous ne prétendons pas expliquer comment le mouvement de la substance nerveuse a la propriété d'exciter la sensation du son : c'est un mystère qu'il ne nous est pas donné d'approfondir.

Pour achever d'éclairer ce sujet, qu'il nous soit permis de recourir à une sorte de démonstration un peu trop familière, mais qui néanmoins a son utilité.

Supposons cinq jeunes écoliers, A, B, C, D, E (*fig.* 2), rangés en file, chacun d'eux appuyant ses mains sur le dos de celui qui le précède. A est placé derrière B, B derrière C, etc. Tout à coup, on pousse de la main A, qui s'incline ; A pousse B, et reprend la position droite ; de même B pousse C, C pousse D, et D pousse E; chaque enfant, après avoir communiqué la poussée qu'il a reçue, reprenant sa position primitive. Le dernier de la file, E, n'ayant personne

Fig. 2.



devant lui pour s'appuyer, est jeté en avant et tombe le visage contre terre. S'il se trouvait sur le bord d'un abîme, il y serait précipité ; placé près d'une fenêtre, il en briserait les vitres ; devant la membrane d'un tambour, sa tête ferait l'effet d'une baguette. On pourrait transmettre de même une poussée d'un bout à l'autre d'une rangée d'une centaine d'enfants, sans que chacun eut à subir autre chose qu'un mouvement ou inclinaison en avant et en arrière. C'est ainsi que nous lançons le son à travers l'air et que nous faisons battre à distance le tambour de l'oreille, tandis que chaque molécule de l'air servant à cette transmission ne fait qu'une petite oscillation.

L'éducation scientifique doit nous apprendre à voir dans la nature l'invisible aussi bien que le visible ; à peindre aux yeux de notre esprit ce qui échappe aux yeux du corps ; à pénétrer jusqu'aux atomes des corps en mouvement ou en repos ; à suivre ces atomes dans leurs évolutions, sans jamais les perdre de vue ; à saisir leur action sur nos sens, et le rôle qu'ils jouent dans la production des phénomènes naturels. Dans le cas qui nous occupe, il s'agit, par un effort d'esprit, de se former une idée vraie d'une onde sonore ; de chercher à voir mentalement les molécules d'air pressées d'abord les unes contre les autres par l'explosion du ballon, puis ramenées, immédiatement après cette condensation, par un effet contraire de dilatation ou de raréfaction. Nous nous représenterons une onde sonore comme composée de deux parties : dans l'une, l'air est condensé, tandis que dans l'autre, au contraire, il est raréfié. Une condensation et une dilatation, voilà donc ce qui constitue essentiellement une onde de son [1].

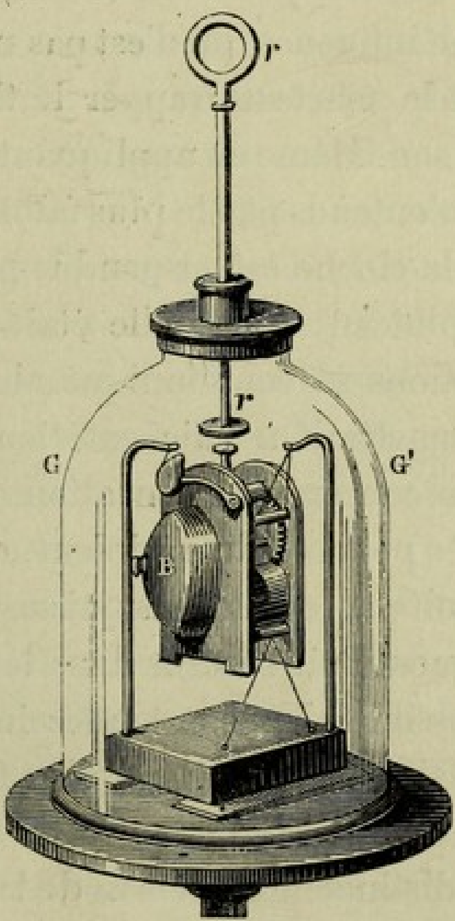
Revenons pour un instant à notre rangée de petits garçons, car nous n'en avons pas encore tiré tout ce qu'elle peut nous fournir. Lorsqu'on pousse A, il peut céder lentement à l'impulsion reçue, la transmettre d'une manière lente à son voisin, et se relever avec lenteur. Dans ce cas, et s'il en est de même de B à C, de C à D, etc., le mouvement se propagera lentement d'une extrémité à l'autre de la ligne. Mais A peut aussi transmettre vivement l'impulsion qu'il a reçue, et, par un effort énergique, se remettre promptement au repos ; il peut en être ainsi de B, de C, de D, etc. : le mouvement alors est transmis rapidement à travers la file entière. Ces efforts musculaires secs et soudains représentent mieux les effets de l'élasticité de l'air dans la transmission des ondes sonores. Une lame d'air, poussée contre une lame d'air contiguë, lui transmet son mouvement, puis recule, en vertu de la force élastique qui s'exerce entre les deux lames, et, plus ces deux effets successifs sont rapides, c'est-à-dire plus est grande l'élasticité de l'air, plus grande aussi est la vitesse du son.

Mais, si l'air est nécessaire à la propagation du son, qu'arrivera-t-il lorsqu'un un corps sonore, par exemple un timbre d'horloge, sera placé dans un espace vide d'air ? Il arrivera qu'aucun son ne pourra sortir de l'espace vide. Le marteau pourra frapper le timbre, mais il le frappera silencieusement. Le physicien Hawksbee démontra ce fait en 1705,

[1] L'onde sonore sera définie plus complétement dans la deuxième leçon.

par une expérience mémorable, devant la Société royale de Londres. Il plaça une cloche sous le récipient d'une machine pneumatique, de telle manière que le choc du battant pouvait continuer de se produire après que l'air avait été épuisé. Tant que le récipient était plein d'air, on entendait le son de la cloche; mais on ne l'entendait plus, ou du moins il était devenu extrêmement faible, quand on avait fait le vide. Voici un appareil qui permet de mieux répéter l'expérience de Hawksbee. Sous ce récipient G G' (*fig.* 3)[1], pressé contre le

Fig. 3.



plateau d'une machine pneumatique, se trouve un mouvement d'horlogerie avec sonnerie. On épuise l'air aussi parfaitement que possible; puis, au moyen d'une tige *r r*, qui traverse le sommet du récipient sans permettre à l'air extérieur de s'y introduire, on lâche la détente qui retient le

[1] Cet instrument très-efficace a été donné à l'Institution royale par M. Warren de la Rue.

marteau. Le marteau frappe, vous voyez ses chocs répétés contre le timbre ; mais, à moins d'être placés très-près de l'appareil, vous n'entendez aucun son. Faisons pénétrer maintenant dans le recipient du gaz hydrogène , qui est, comme vous le savez, quatorze fois plus léger que l'air. Le son ne se trouve pas sensiblement augmenté par la présence de ce gaz, qui remplit cependant tout le récipient[1]. Si l'on continue la manœuvre de la machine , l'air devient encore plus raréfié ; on peut obtenir ainsi un vide plus parfait que celui de Hawksbee, et c'est un point important, car les dernières traces d'air ont une influence qui n'est pas négligeable. Vous voyez maintenant le marteau frapper le timbre, mais vous n'entendez aucun son. Même en appliquant l'oreille contre le récipient vide, je n'entends pas le plus faible tintement. Vous remarquerez que la cloche est suspendue par des cordons, et non posée sur le plateau ; car, si elle était en contact avec le plateau, les vibrations se communiqueraient à la masse solide, qui les transmettrait à l'air extérieur. Tout ce qu'on peut entendre , en concentrant son attention et plaçant son oreille le plus près possible du récipient, est un son à peine perceptible, conduit par les cordons qui suspendent la cloche. Laissons actuellement l'air rentrer dans le récipient, avec le moins de bruit possible. Vous entendez immédiatement un son d'abord très-faible, qui devient plus fort à mesure que l'air devient plus dense. Enfin, toutes les personnes ici présentes entendent distinctement le son de la cloche[2].

A de grandes hauteurs dans l'atmosphère, l'intensité du

[1] Leslie a fait le premier cette remarque. De l'air réduit par raréfaction à la densité de l'hydrogène transmet le son beaucoup mieux que ce gaz. Une atmosphère complète d'hydrogène ne rend pas perceptible le son d'une cloche, tandis qu'un quinzième d'atmosphère d'air le rend très-sensible.

[2] En faisant tomber le faisceau de lumière de la lampe électrique sur des boules de verre remplies d'un mélange, à volumes égaux, de chlore et d'hydrogène, j'ai déterminé leur explosion dans l'air et dans le vide. La différence, quoique moins frappante que je l'avais imaginé, était cependant parfaitement marquée.

son est notablement diminuée. Suivant les estimations de Saussure, la détonation d'un coup de pistolet au sommet de Mont-Blanc équivaut à celle d'un simple pétard ordinaire, au niveau de la plaine. J'ai répété plusieurs fois cette expérience : la première fois, avec un petit canon d'étain dont vous avez devant vous les débris, et, plus tard, avec des pistolets. Ce qui me frappa particulièrement, ce fut l'absence de cette plénitude et de cette netteté de son qui caractérisent un coup de pistolet à des élévations moindres ; le coup produisait l'effet d'une bouteille de vin de Champagne, et cependant le son ne laissait pas d'être encore assez intense. La soustraction de la moitié d'une atmosphère ne modifie pas très-notablement le bruit d'une cloche, et l'air est assez dense au sommet du Mont-Blanc pour impressionner fortement les nerfs auditifs. Le fait qu'un air même très-raréfié peut transmettre des sons intenses est démontré par les explosions de météorites à de grandes hauteurs au-dessus de la terre ; il est vrai que, dans ces derniers cas, la cause initiale de la commotion atmosphérique doit être extrêmement violente.

Le mouvement sonore, comme tout autre mouvement, s'affaiblit lorsqu'il se communique d'un corps léger à un corps pesant. Enlevons le récipient qui recouvre le timbre de notre expérience, et vous entendrez beaucoup mieux sa sonnerie. Quand le timbre était recouvert, les vibrations de l'air se communiquaient d'abord à la masse du verre des parois du récipient, et ensuite du verre à l'air extérieur ; de là, un grand affaiblissement de l'intensité du son. L'action de l'hydrogène sur la voix est un phénomène de même genre. La voix se forme par l'injection de l'air des poumons dans un organe appelé le *larynx*. Dans son passage à travers cet organe, l'air est mis en vibration par les cordes vocales, qui engendrent ainsi le son. Or, si l'on remplit ses poumons d'hydrogène et qu'on veuille parler, les cordes vocales impriment encore leur mouvement à l'hydrogène, qui le transmet à l'air extérieur; mais cette transmission d'un gaz léger à un gaz beaucoup plus pesant a pour conséquence une diminution considérable de la force du son. Cet effet est véritablement curieux. Vous connaissez la force et le timbre de ma voix. J'expulse l'air de mes poumons, je les remplis d'hydrogène aspiré de ce réservoir, et je m'efforce de parler haut; mais ma voix a perdu singulièrement de sa puissance, et le timbre n'en est plus le même. Vous l'entendez cette voix rauque et caverneuse, qui n'est plus une voix humaine, et qui semble même n'être pas de ce monde. Je ne puis la décrire autrement.

L'intensité du son dépend de l'intensité de l'air au sein duquel il prend naissance, et non de celle de l'air au sein duquel il est entendu. Supposons que le sommet du Mont-Blanc soit également distant du sommet de l'Aiguille Verte et du pont de Chamouny, et que deux observateurs soient placés, l'un sur le pont, l'autre sur l'aiguille: le son d'un coup de canon tiré sur le Mont-Blanc aura la même intensité pour ces deux observateurs, bien que, dans un des cas, il ait parcouru un air constamment raréfié, et dans l'autre, un air de plus en plus dense. Supposons maintenant qu'on prenne dans la vallée de Chamouny un point situé à la même distance, mesurée en ligne droite, que le Mont-Blanc du pont de Chamouny, et que deux observateurs soient placés l'un en ce point de la vallée, l'autre sur le Mont-Blanc: le son d'un coup de canon tiré sur le pont atteindra ces observateurs avec la même force, bien que l'un d'eux stationne dans un air dense, et l'autre dans un air raréfié. Qu'on charge de la même manière deux canons semblables, et qu'on les tire, l'un sur le pont de Chamouny, et l'autre sur le Mont-Blanc, il pourra se faire que le premier soit entendu d'un observateur placé sur le Mont-Blanc, et que le second ne soit pas entendu sur le pont de Chamouny.

Nous avons déjà, sans doute, une première idée parfaitement claire de la propagation, à travers l'air environnant, du son né de l'explosion du ballon. L'onde sonore propagée dans tous les sens à partir du point où l'explosion a été produite la diffuse dans la masse d'air ébranlée, qui va sans cesse en augmentant, et il est évident que ce ne peut être sans un certain affaiblissement du mouvement propagé. Supposons autour du centre d'ébranlement une couche d'air sphérique d'un mètre de rayon; une couche d'air de même épaisseur et dont le rayon est de deux mètres contient quatre fois plus d'air; une couche de trois mètres de rayon en contient neuf fois plus; une couche de quatre mètres en contient seize fois plus, et ainsi de suite. La quantité de matière mise en mouvement augmente donc comme le carré de la distance au centre d'ébranlement. *L'intensité* ou l'éclat du son diminue dans le même rapport. Nous énonçons cette loi en disant que l'intensité du son varie en raison inverse du carré de la distance.

Nous allons maintenant envisager le sujet sous un autre point de vue. L'effet mécanique d'une balle qui frappe une cible dépend de deux données, le poids de la balle et sa vitesse : cet effet est proportionnel au simple poids de la balle, mais il est proportionnel au carré de la vitesse. La démonstration de ces deux lois rentre dans la mécanique générale plutôt que dans notre sujet actuel. Cela posé, ce qui est vrai pour une balle frappant la cible l'est également pour une molécule d'air frappant le tympan de l'oreille. Examinez attentivement comment se comporte une molécule d'air atteinte par une onde sonore :

au premier instant, elle est tirée de son état de repos et poussée vers la molécule voisine ; elle prend ainsi un mouvement, d'abord accéléré, et qui se ralentit ensuite ; la force qui lui donne l'impulsion rencontre dans l'élasticité de l'air une force antagoniste, qui finit par arrêter la molécule et la faire reculer. A un certain point de l'excursion, la vitesse atteint un maximum, et *l'intensité du son est proportionnelle au carré de cette vitesse maximum*. L'effet sonore est donc soumis à la même loi que l'effet mécanique. Tout ce que nous éprouvons par l'effet des agents extérieurs dépend des lois de la mécanique ; si nous entendons un son plus fort qu'un autre, c'est parceque nos nerfs auditifs sont ébranlés plus fortement dans le premier cas que dans le second.

L'espace que parcourt la molécule d'air dans son mouvement de va-et-vient, ou dans l'acte de transmission de l'onde, se nomme l'*amplitude* de la vibration. L'intensité du son est aussi proportionnelle au carré de cette amplitude.

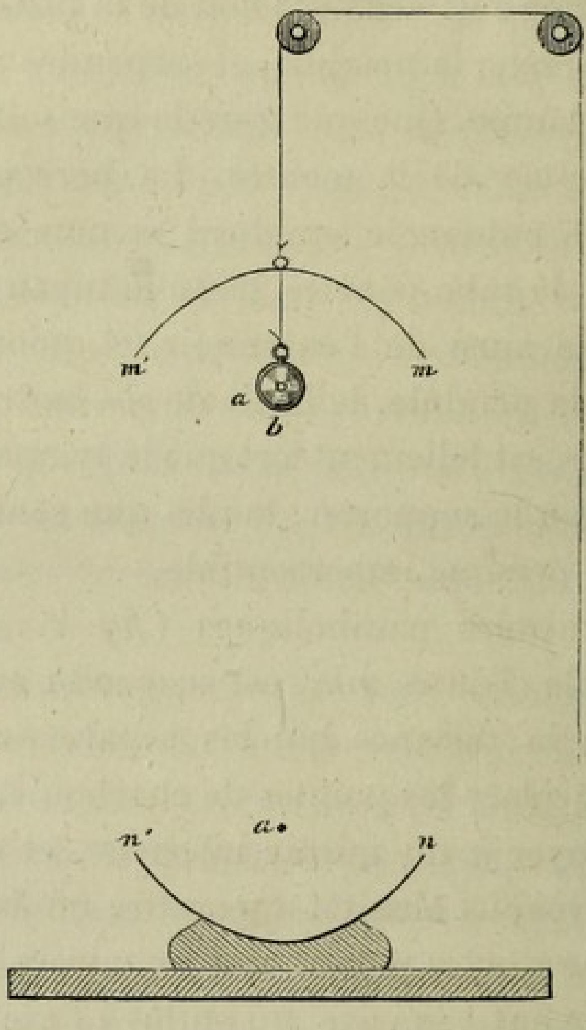
L'affaiblissement du son, en raison inverse du carré de la distance, n'aurait plus lieu, si l'onde sonore se propageait dans des conditions qui ne permissent pas sa diffusion latérale. En lançant le son dans un tube dont la surface intérieure est exempte de toute aspérité, nous réalisons ces conditions essentielles, et l'onde ainsi confinée se propage à de grandes distances, presque sans rien perdre de son intensité. Prenez ce tube en fer blanc de cinq mètres de long, appliquez votre bouche à son embouchure, parlez si bas que vous ne soyez entendu d'aucun de vos voisins : une personne qui prêtera l'oreille à l'autre extrémité vous entendra parfaitement, de même qu'elle entendra le tic-tac de votre montre, si vous la placez à l'orifice du tube. Maintenant, devant l'extrémité du même tube dressons une bougie allumée, et battons des mains à l'orifice opposé : la flamme s'éteint ou menace de s'éteindre. Elle s'éteint tout à fait, si l'on frappe deux volumes l'un contre l'autre. Vous pouvez observer ici, au moins d'une manière approchée, la vitesse avec laquelle le son se propage. La flamme s'éteint à l'instant même où le choc des mains a lieu, il n'y a pas d'intervalle sensible entre le battement et l'extinction de la flamme. Nous ne voulons pas dire cependant que le son n'emploie absolument aucun temps déterminable à parcourir la longueur du tube, mais ce temps est si court que nos sens ne peuvent l'apprécier. Pour montrer que c'est bien un mouvement *ondulatoire*, et non un *courant* ou une bouffée d'air qui éteint la bougie, il suffit de remplir de fumée de papier très-épaisse et très-visible l'extrémité du tube voisine de la bougie, et de reproduire à l'autre extrémité le choc des deux volumes : vous ne voyez aucune trace de fumée sortir du tube. L'onde a traversé la fumée aussi bien que l'air, en les laissant à leur place.

Passons à une autre expérience. Ce tube en gutta-percha, dont une extrémité est à portée de ma main, et qui peut avoir trois centimètres de diamètre intérieur, va à travers le plancher dans une chambre située au-dessous, et se prolonge jusque dans une des cours de cet établissement, où il se termine en entonnoir. Mon préparateur ou aide est dans cette cour : là il pourra crier aussi fort qu'il lui plaira ; aussi longtemps qu'il se tiendra à distance de l'embouchure du tube, nous ne l'entendrons pas ; mais voici qu'il parle dans le tube à voix très-basse, et je l'entends. De mon côté, je lui adresse la parole aussi par le tube, je lui dis : *Etes-vous prêt ?* et vous entendez sa réponse. Je l'invite à produire en chantant une note continue, et vous entendez cette note retentir au milieu de nous. En fermant et ouvrant le tube alternativement, je suspends ou je rétablis cette correspondance musicale : il me suffit de mettre mon pouce sur l'ouverture du tube pour arrêter le son. Voici que mon homme souffle dans un cornet à l'entrée du tube, et vous êtes étourdis par le son strident de cet instrument. Je lui demande de chanter, et vous entendez notre hymne national; ce n'est pas d'ailleurs un chant affaibli par la distance, on dirait qu'un petit chanteur se tient caché à cette extrémité du tube. Un physicien français, Biot, si justement célèbre, observa la transmission du son dans les tuyaux vides des conduites d'eau de la ville de Paris, et il trouva qu'à voix basse il pouvait entretenir une conversation à la distance d'un kilomètre. Le plus faible murmure de la voix était entendu à cette distance, et la détonation d'un pistolet à une des extrémités du tube éteignait une bougie placée à l'autre extrémité.

La propagation du son, telle que nous venons de l'établir, est la même que celle de la lumière et de la chaleur rayonnante, qui ne sont aussi que des mouvements ondulatoires. De même que le son, la lumière et la chaleur rayonnante se répandent indéfiniment dans l'espace, en diminuant d'intensité suivant la même loi; de même que le son, elles perdent très-peu de leur intensité en se propageant dans des tubes dont la surface intérieure est parfaitement polie. En outre, toutes les expériences sur la réflexion de la lumière ont leur analogue dans la réflexion du son. Vous voyez dans cette galerie, tout près de la pendule affectée au service de l'amphithéâtre, une lampe électrique. Un aide, placé dans la galerie, allume la lampe et en dirige la lumière vers un miroir concave placé au-delà de cette chaire. Par un effet de réflexion particulier à cette sorte de miroir, les rayons divergents qui tombent sur sa surface deviennent convergents et produisent ce beau cône de lumière. Je marque le point de convergence, ou sommet du cône, je fais éteindre la lampe et je place en ce point mon oreille. C'est en ce point que viennent concourir toutes les ondes sonores émises par la pendule après leur réflexion sur le miroir, et j'entends ses battements comme s'ils venaient non de la pendule, mais du miroir. Je fais arrêter la pendule, et suspendre une montre à la place de la lampe. Quelque grande que soit la distance, j'entends le tic-tac de la montre. La perception du son est aidée par un entonnoir employé comme cornet acoustique, et dont le tube pénètre dans le tuyau de l'oreille : quand on s'aide ainsi de l'entonnoir, et qu'on a rétabli le mouvement de la pendule, le bruit de ses battements, réfléchi par le miroir, est tellement fort que le tympan de l'oreille a quelque peine à le supporter, tandis que sans le miroir ce même bruit est presque imperceptible.

Voici deux miroirs paraboliques (*fig.* 4) : l'un nn' est placé sur la table, l'autre mm' est suspendu au plafond de l'amphithéâtre ; la distance qui les sépare est de plus de huit mètres. On place les pointes de charbon de la lumière électrique au foyer a du miroir inférieur, et on établit le courant. Nous voyons aussitôt apparaître un beau cylindre lumineux, formé par les rayons que le miroir inférieur réfléchit parallèlement à son axe, ou plutôt à l'axe commun des deux miroirs. Ces rayons vont frapper le second miroir, qui les réfléchit vers son propre foyer. Une montre suspendue en ce dernier point réfléchit, dans toutes les directions, les rayons qui s'y trouvent concentrés, et il en résulte une petite image lumineuse aussi brillante que le soleil. Quant à la montre, bien qu'elle marche, dans ma position actuelle, je ne puis entendre le bruit de ses battements, parce que toutes les ondes sonores émises par elle doivent, après leur réflexion par le miroir inférieur, converger vers son foyer a. Effectivement, en appliquant l'oreille en a, j'entends le tic-tac aussi distinctement que je pourrais l'entendre si j'avais la montre dans la main; le son parvient à mon oreille comme s'il émanait du miroir inférieur.

Fig. 4.



Les voûtes et les plafonds à arêtes courbes agissent comme des miroirs sur le son. Dans notre laboratoire, par exemple, il y a des points où le bouillonnement d'une chaudière placée sur le fourneau semble venir du plafond. Des dispositions fortuites de cette nature ont amené parfois la révélation de secrets plus ou moins graves; Herschel en cite un exemple piquant. Dans une des cathédrales de Sicile, un confessionnal était placé de telle manière, que les confidences du pénitent, réfléchies par les arêtes creuses de la voûte, allaient former foyer en un point de l'édifice assez distant. Le lieu de ce foyer fut accidentellement découvert, et la personne qui l'avait trouvé prit plaisir à écouter et à faire écouter par ses amis des aveux que le prêtre seul devait entendre. Un jour, dit-on, que le confessionnal était occupé par sa propre femme, il fut initié, lui et ses amis, à des secrets qui n'avaient rien d'agréable pour lui.

Lorsqu'il existe un intervalle suffisant entre le son direct et le son réfléchi, celui-ci devient un *écho*. Le son réfléchi se propage avec la même vitesse que le son direct, de sorte que, dans l'air, à la température de la glace fondante, si l'on tire un coup de pistolet en face d'un mur distant de 332 mètres, on entend l'écho deux secondes après l'explosion.

Le son, comme la lumière, peut subir plusieurs réflexions successives ; mais, de même que la lumière s'affaiblit en se réfléchissant, de même aussi les échos successifs sont de plus en plus faibles. Dans les pays de montagnes, cette répétition, avec affaiblissement graduel du son, produit des effets qui surprennent et amusent singulièrement. Les personnes qui ont visité Killarney ne peuvent oublier le célèbre écho de la caverne de Dunloe. Quand on sonne de la trompette en un certain point de la caverne, le son réfléchi, après une, deux ou trois réflexions sur les flancs escarpés des rochers, semble mourir peu à peu de la manière la plus agréable pour l'oreille. Il y a en Suisse, près de Rosenlaui, un profond *cul-de-sac*, nommé l'Ochensthal, où le babil des échos n'est pas moins étonnant. Le son du cornet des bergers alpins, retentissant sur les rochers du Wetterhorn ou de la Jungfrau, est dur au premier instant ; mais les notes perdent leur âpreté par des réflexions successives ; bientôt elles ont la douceur des sons de la flûte, et la sensation de leur diminution incessante d'intensité fait croire que la source des sons va se perdant dans les solitudes lointaines de glace et de neige.

Dans les chambres très-spacieuses et non garnies de meubles, on a quelquefois l'occasion de faire des remarques intéressantes. Si, par exemple, on se tient sur le bord de la galerie supérieure de la Bourse, à Paris, on est abasourdi par le vacarme étrange des voix de la multitude animée qui s'agite en bas. Vous voyez tous les mouvements des lèvres aussi bien que des mains et des bras, vous savez qu'on parle, mais ce qu'on dit, vous ne le percevez pas. C'est que le mélange des voix avec leurs échos forme un chaos de bruit d'où ne saurait sortir aucune expression intelligible. Les meubles et les draperies des chambres amortissent les échos. Souvent la voix d'un orateur, dans une grande salle, ne devient intelligible que par la présence d'un nombreux auditoire; dans la salle vide, la résonnance ou les échos rendraient la voix confuse. Le 16 mai 1865, ayant à faire une lecture dans la salle du Sénat de l'Université de Cambridge, je fis d'abord quelques expériences sur l'intensité que je devais donner à ma voix pour arriver à remplir la salle, et je fus déconcerté de trouver qu'un ami, placé à quelque distance de moi, ne pouvait m'entendre distinctement, par suite de la résonnance des échos. Et cependant, lorsque mon auditoire fut réuni, les ondes sonores étaient assez amorties pour qu'il n'y eût plus d'échos, et ma voix fut parfaitement entendue de tous les points de la salle.

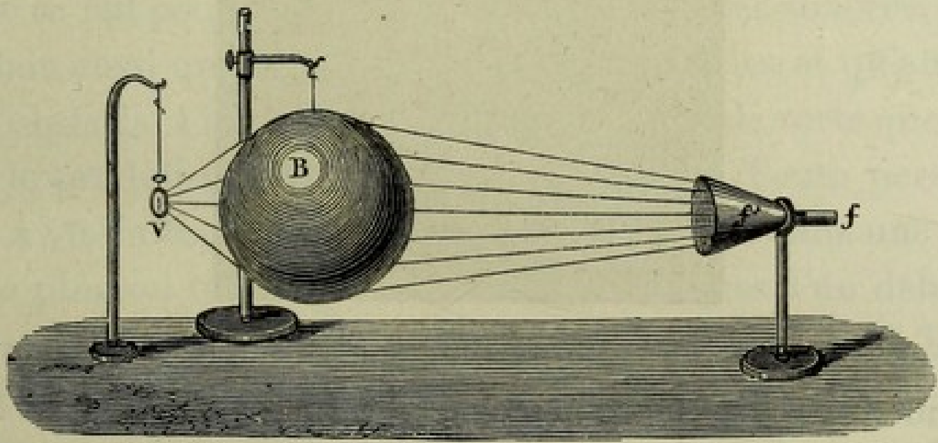
Les nuages aussi réfléchissent le son. Quand le ciel est clair, le bruit du canon, dans une vaste plaine, est bref et sec; tandis qu'un nuage suffit, en répercutant le son, pour produire, par un effet d'écho, un roulement comparable à celui du tonnerre. Un faible écho naît quelquefois du passage du son d'une masse d'air dans une autre de densité différente. Humboldt rapporte que, d'une certaine position dans la plaine d'Antures, le bruit de la grande chute de l'Orénoque ressemble au tumulte des flots qui se brisent sur un rivage rocheux, et il ajoute, comme une circonstance remarquable, que ce bruit est beaucoup plus fort la nuit que le jour. Cette différence ne peut s'expliquer par la tranquillité de la nuit, car le bourdonnement des insectes et les rugissements des bêtes fauves dans cette contrée rendent la nuit beaucoup plus bruyante que le jour. Humboldt en donne l'explication suivante. Entre la chute d'eau et le point qu'il occupait, s'étend une plaine dont la surface verdoyante est parsemée d'une multitude de roches nues : or, ces roches prennent, sous l'action du soleil, une température notablement plus élevée que celle de l'herbe qui les environne, et, par conséquent, au-dessus de chacune d'elles, s'élève une colonne d'air chaud moins dense. Il en résulte que, pendant le jour, le son de la chute doit traverser une atmosphère dont la densité change souvent, et, parce que chacune des surfaces qui limitent ces masses d'air, tantôt raréfié, tantôt plus dense, fait naître un écho, le son, dans son parcours, est nécessairement affaibli. La nuit, ces différences de température n'existent plus, et, propagé à travers une atmosphère homogène, le son arrive à l'oreille sans avoir été affaibli par la réflexion. L'optique nous offre un cas analogue : la lumière subit une réflexion à la surface de séparation de deux milieux de densité différente, de sorte qu'une succession de plusieurs milieux, tous transparents, peut devenir impénétrable à la lumière par les réflexions répétées qu'elle lui fait subir. C'est ainsi qu'on peut réaliser un mélange d'air et d'écume d'eau qui, sous une épaisseur modérée, ne peut plus être traversé par la lumière, à cause des réflexions nombreuses qu'elle subit. C'est encore par la même raison que toutes les substances transparentes et incolores deviennent blanches et opaques quand elles sont réduites en poudre.

Les éclats de tonnerre les plus violents ne s'étendent pas à de très-grandes distances, par suite du défaut d'homogénéité de l'atmosphère dans les temps d'orages. On a vu de grandes batailles livrées et perdues par une armée, parce que ses réserves, placées à une assez petite distance, attendaient le bruit du canon pour aller prendre part à l'action, et l'attendaient vainement. On a souvent considéré la neige, quand elle tombe épaisse, comme un grand obstacle à la propagation du son ; il me semble que cet effet a été exagéré, et que le son poursuit sa route sans trop de peine à travers les flocons de neige. Le 29 décembre 1859, je traversais la *mer de glace* de Chamouny, à une hauteur d'environ 2 100 mètres au-dessus du niveau de la mer. Le glacier, sur ce point, était large de 800 mètres, et lorsque je me disposais à partir, la neige commença à tomber avec abondance ; jamais en Angleterre je ne l'avais vue si condensée. Cependant, même au plus fort de la tempête, je pouvais voir le glacier dans toute sa largeur et faire entendre ma voix à la rive opposée. De mon côté, j'entendis fort distinctement des hommes s'écrier : *Nous sommes perdus*, alors que j'étais séparé d'eux par huit cents mètres de flocons de neige.

Sir John Herschel, dans son excellent article sur le son, de l'*Encyclopédie métropolitaine*, a recueilli entre autres ces exemples d'échos : — Dans Woodstock-Park, un écho répète dix-sept fois les syllabes pendant le jour et vingt fois pendant la nuit ; un autre les répète quinze fois sur les bords du lac de Lupo, au-dessus de la chute de Terni. Le tic-tac d'une montre se fait entendre d'une extrémité à l'autre de l'église abbatiale de Saint-Albans. Dans la cathédrale de Glocester, une galerie de forme octogonale transmet un murmure, à travers la nef, sur un parcours de 25 mètres. La galerie acoustique de Saint-Paul transmet pareillement le son le plus faible d'un angle du dôme à l'autre, sans qu'il puisse être entendu en aucun point intermédiaire. Dans le château de Carisbrook, île de Wight, on voit un puits profond de 70 mètres et large de 4 ; le revêtement de maçonnerie qui garnit l'intérieur présente une surface parfaitement lisse. Quand on y laisse tomber une épingle, on entend très-distinctement le bruit de sa chute dans l'eau. Une parole un peu haute ou un cri poussé à l'entrée du puits sont suivis d'un long retentissement[1].

J'ai maintenant à signaler, entre le son et la lumière, une autre analogie fort importante, mise en évidence par M. Sondhauss[2]. Allumons notre lampe électrique, et plaçons en avant d'elle cette belle et grande lentille. La lentille a la propriété de faire dévier de leur direction primitive les rayons de lumière qui la traversent, de les rendre convergents de divergents qu'ils étaient, et de former ainsi un cône lumineux. Cette *réfraction* des rayons de lumière est un effet du ralentissement de leur marche dans l'épaisseur du verre. Eh bien, le son peut être pareillement réfracté, et il le sera si on lui fait aussi traverser une lentille qui retarde son mouvement. On réalise une semblable lentille, en remplissant un ballon léger de quelque gaz plus dense que l'air. On prend, par exemple, un ballon de collodion B (*fig.* 5) rempli de gaz

Fig. 5.



acide carbonique, et dont l'enveloppe est assez mince pour

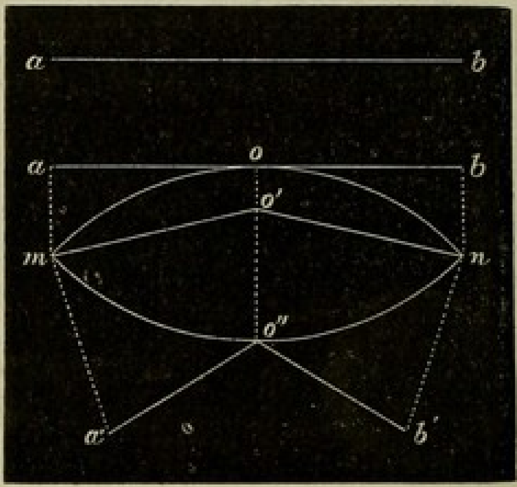
[1] En se plaçant au sommet de la muraille intérieure du Colosseum de Londres, bâtiment circulaire de 43 mètres de diamètre, M. Wheatstone trouva que chaque mot prononcé était répété un grand nombre de fois. La plus simple exclamation produisait comme un éclat de rire, et la déchirure d'un morceau de papier comme le crépitement de la grêle.

[2] *Poggendorff's Annalen*, vol. LXXXV, p. 378 ; *Philosoph. Mag.*, vol. V, p. 73.

n'opposer aucun obstacle sensible à la propagation des ondes sonores. On suspend une montre V en arrière, près de la lentille, et en avant, à la distance de 12 à 15 décimètres, on place son oreille armée d'un entonnoir de verre f'. En faisant varier la position de la tête, on parvient, sans de longs tâtonnements, à trouver le point où le son de la montre s'entend le mieux. Cette position particulière est le foyer de la lentille. Si on en écarte l'oreille, le son perçu s'affaiblit ; il en est de même si l'on écarte le ballon de sa position, parce qu'alors son foyer se déplace. On constate ainsi que la lentille fait entendre, dans la position convenable, le son clair et distinct du mouvement de la montre, et qu'on ne l'entendrait pas du tout, à la même distance, sans le secours de cet appareil.

Comment des ondes sonores peuvent-elles être ainsi rendues convergentes ? La figure 6 nous le fera comprendre. Soit *mn*

Fig. 6.



une section faite dans la lentille acoustique, et *ab* une portion d'onde sonore arrivant à la lentille. Le point *o* de la ligne médiane de l'onde est le premier qui rencontre la lentille; il la pénètre, et sa marche se ralentit. Pendant que les points extrêmes *a* et *b* se meuvent encore dans l'air pour atteindre la lentille, le point médian *o*, poursuivant sa marche dans un milieu plus dense, arrive en *o'*. L'onde est par conséquent brisée en o', et, comme la direction du mouvement est perpendiculaire à la face de l'onde, ces deux moitiés empiéteront maintenant l'une sur l'autre. La convergence des deux moitiés de l'onde se trouve augmentée lorsqu'elles sortent de la lentille. En effet, lorsque o' est en o'', les extrémités a et b ont parcouru un plus grand espace, et sont, par exemple, en a' et b'. Bientôt après, les deux moitiés se seront croisées complétement l'une l'autre, c'est-à-dire, en d'autres termes, qu'elles seront en un foyer commun où l'air recevra la somme des mouvements des deux demi-ondes [1].

Lorsqu'une longue vague de la mer rencontre sur son passage un rocher isolé, elle monte le long de ses flancs et l'entoure de tous les côtés. Les faits de cette nature amenèrent Newton à rejeter la théorie ondulatoire de la lumière. Il prétendait que, si la lumière était produite par un mouvement d'ondes, il n'y aurait pas d'ombre, parce que les ondes lumineuses se répandraient autour des corps opaques comme les vagues autour des rochers. Il est démontré aujourd'hui que les ondes lumineuses se courbent autour des corps opaques, et tendent à les envelopper ; mais nous n'avons rien à faire avec ce fait pour le moment. Quant aux ondes sonores, il est certain aussi qu'elles contournent les obstacles et qu'au delà de l'obstacle, l'intensité du son est moindre, de sorte que l'obstacle produit une ombre partielle du son. Toute personne qui a vu un train de chemin de fer pénétrer dans une tranchée plus ou moins profonde entre les flancs d'un déblai, a constaté que le son diminuait beaucoup d'intensité. L'interposition d'une colline des Alpes, ou d'un simple mamelon, suffit pour intercepter ou amortir beaucoup le bruit d'une cataracte, ou le tintement des clochettes des vaches. Cependant, comme je l'ai dit, les ombres de son ne sont pas com-

[1] Nous avons supposé, pour plus de simplicité, l'onde brisée en o', et les deux demi-ondes représentées par des lignes droites. Dans le fait, la surface de l'onde est courbe, et sa concavité est tournée dans le sens de la marche du son.

plètes, elles ne sont que partielles ; l'homme chargé de marquer les coups sur une cible ne manque pas d'entendre les explosions, quoiqu'il soit bien protégé contre les balles. L'exemple le plus frappant de cette inflexion des ondes sonores dont j'aie été témoin accompagna la terrible explosion d'un magasin de poudre survenue à Érith, en 1864. Le village d'Érith est éloigné de quelques milles du magasin de poudre ; cependant presque toutes les vitres des fenêtres volèrent en éclats, et l'on remarqua que les fenêtres tournées du côté opposé au centre de l'explosion souffrirent presque autant que celles qui lui faisaient face. Dans l'église d'Érith, les fenêtres étaient à châssis de plomb, et la flexibilité de ce métal permit aux vitres de céder à la pression sans trop de fractures ; or, toutes les fenêtres de l'église, celles de derrière comme celles de front, étaient courbées *vers l'intérieur* : ce fait s'explique très-simplement. L'onde sonore, en atteignant l'église, se divisa en deux branches, qui passèrent l'une à droite et l'autre à gauche ; pendant un instant, l'édifice subit l'étreinte d'une ceinture d'air fortement comprimé, et la surface flexible des fenêtres prit une courbure de dehors en dedans. Sans doute, après cet instant de compression, l'air intérieur dut réagir et tendre au redressement des surfaces infléchies ; mais sa compression ayant été faible relativement à celle de l'air extérieur, l'effet de réaction ou de recul resta très-limité en comparaison de l'effet du choc direct ; il fut impuissant à ramener les vitraux dans leur état primitif.

Après avoir ainsi considéré la réflexion, la réfraction et l'inflexion du son, nous devons reporter nos regards sur sa propagation, pour examiner attentivement deux conditions qui déterminent essentiellement la vitesse de l'onde sonore, savoir : l'élasticité et la densité du milieu qu'elle traverse. L'élasticité de l'air se mesure par la pression qu'il supporte et à laquelle il fait équilibre. Au niveau de la mer, la pression moyenne de l'air est égale à celle d'une colonne de mercure qui aurait environ 76 centimètres de hauteur. Au sommet du Mont-Blanc, la colonne barométrique dépasse à peine la moitié de cette hauteur, et, par conséquent, au point le plus élevé de cette montagne, l'élasticité de l'air n'a que la moitié environ de sa valeur sur le rivage des mers.

Si nous pouvions augmenter l'élasticité de l'air sans augmenter en même temps sa densité, nous augmenterions la vitesse du son. Nous l'augmenterions encore, si nous pouvions diminuer la densité sans faire varier l'élasticité. Cela posé, l'air chauffé au sein d'un vase clos, où il ne peut pas se dilater, a son élasticité accrue par la chaleur, en même temps que sa densité reste la même. Au travers de l'air ainsi échauffé, le son se propagera donc plus rapidement qu'à travers l'air libre. Pareillement l'air auquel on laisse la liberté de se dilater a sa densité diminuée par la chaleur, tandis que son élasticité reste la même, et par conséquent il propagera le son avec plus de vitesse que l'air froid : c'est ce qui arrive lorsque notre atmosphère est échauffée par le soleil. L'air se dilate et devient plus léger, volume pour volume, tandis que sa pression ou, en d'autres termes, son élasticité reste la même. Ainsi s'explique cette phrase que la vitesse du son dans l'air est *de 332 mètres par seconde, à la température de la glace fondante*. A de plus basses températures, la vitesse est moindre, et à de plus hautes températures elle est plus grande. Wertheim a déterminé la vitesse du son dans l'air à diverses températures, et il a trouvé :

Température de l'air.	Vitesse du son.
0° 5	331^{m} 9
2, 1	331, 3
8, 5	338, 0
12, 0	339, 2
26, 6	347, 5

Nous voyons donc que la vitesse du son est de $331^m,9$ par seconde à un demi-degré au-dessus de la température de la glace fondante, et de $347^m,5$ à la température de $26°,6$. Une différence de $26°$ de température donne ainsi une différence de $15^m,6$ dans la vitesse du son, ce qui revient en moyenne, à une différence de 6 décimètres par chaque degré de température.

Sous la même pression, c'est-à-dire avec la même élasticité, la densité de l'hydrogène est beaucoup moindre que celle de l'air, et par conséquent la vitesse du son dans le gaz hydrogène surpasse considérablement sa vitesse dans l'air. L'inverse a lieu pour le gaz acide carbonique, qui est plus dense que l'air : dans ce gaz, sous la même pression, la vitesse du son est moindre que dans l'air. Si l'élasticité et la densité varient dans le même rapport, comme cela a lieu, d'après la loi de Mariotte, pour l'air, quand sa température reste constante, les effets des deux variations se neutraliseront l'un l'autre. Donc, si la température est la même, la vitesse du son sera aussi la même au sommet des Alpes et à l'embouchure de la Tamise. Mais, parceque l'air est plus froid à de plus grandes hauteurs, la vitesse du son est moindre sur le sommet des montagnes qu'au niveau des mers. On exprime plus exactement cette loi de la vitesse du son, en empruntant la langue des mathématiques, et disant que cette vitesse est *directement* proportionnelle à la racine carrée de l'élasticité de l'air, *inversement* proportionnelle à la racine carrée de la densité de l'air. Par conséquent, puisque dans l'air, à une température constante, l'élasticité et la densité varient proportionnellement et agissent en sens contraire, la vitesse du son ne sera pas affectée par un changement de densité, s'il est accompagné d'un changement de température. Il n'y a peut-être pas d'erreur plus commune que celle qui consiste à supposer que la vitesse du son augmente avec la densité de l'air. Cette erreur provient d'une mauvaise appréciation de ce fait, que dans les liquides et les solides la vitesse du son est plus grande que dans les gaz. C'est leur très-grande élasticité *relativement à leur densité* qui fait que le son s'y propage plus rapidement. Toutes les autres conditions restant les mêmes, l'augmentation de densité produit toujours une diminution de vitesse du son; si l'élasticité de l'eau, qui est mesurée par sa compressibilité, était simplement égale à celle de l'air, la vitesse du son dans l'eau, au lieu d'être plus que quadruple de sa vitesse dans l'air, n'en serait qu'une très-petite fraction. Notre esprit ne doit donc pas séparer la densité de l'élasticité ; la vitesse du son ne dépend pas de l'une ou de l'autre de ces qualités prises séparément, mais du rapport dans lequel elles sont l'une à l'autre. Nous trouvons un exemple bien frappant des effets d'une très-grande élasticité combinée avec une très-petite densité dans l'éther lumineux, qui transmet les vibrations de la lumière avec la vitesse d'environ 320 000 kilomètres par seconde.

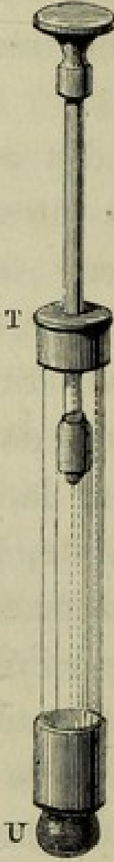
Il est temps de dire un mot des moyens qu'on a employés pour mesurer la vitesse du son dans l'air. Les personnes étrangères aux détails des expériences et des recherches scientifiques ne se font aucune idée de la quantité de labeur dépensé dans la détermination des données numériques qui servent de point de départ aux calculs et aux déductions des théories. Elles ne sauraient s'imaginer la patience déployée par Berzélius dans la détermination des poids atomiques, par Regnault dans la détermination des coefficients de dilatation, par Joule dans la détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur. Il faut, pour mener à bonne fin de pareils travaux, une force de caractère, une sévérité de mœurs, qui ne sont probablement exigées par aucun autre exercice du domaine de l'intelligence. Force est de faire abnégation de tout désir, à l'exception de celui de connaître la vérité; et, pour atteindre une parfaite exactitude, de ne s'épargner aucun travail, de ne reculer devant aucune difficulté. En ce qui concerne spécialement la vitesse du son, de longues heures ne suffiraient pas à faire le simple résumé des efforts déployés pour l'établir avec précision. Cette question a souvent occupé l'attention des physiciens en Angleterre, en France, en Allemagne, en Italie et en Hollande. Mais c'est aux physiciens français et hollandais que revient l'honneur des procédés délicats d'expérimentation qui ont conduit à la solution définitive de ce difficile problème. Ils ont neutralisé l'influence du vent; ils ont tenu compte de la pression barométrique, de la température, et de l'état hygrométrique de l'air. Les sons partaient au même instant de deux stations éloignées, et par conséquent, d'une station à l'autre, ils parcouraient exactement le même air. La distance des stations avait été mesurée trigonométriquement, et l'on avait imaginé les moyens efficaces d'évaluer avec une extrême précision le temps employé par le son à faire son trajet d'une station à l'autre. Ce temps, exprimé en secondes, et divisé par la distance exprimée en mètres, donne 332 mètres par seconde pour la vitesse du son dans l'air à la température 0°.

Le temps que la lumière met à parcourir des espaces terrestres peut être considéré comme nul : aussi, dans les expériences que nous venons de rappeler, l'instant précis de la détonation d'une arme à feu était marqué par l'apparition de sa lumière; et la durée de la transmission du son était l'intervalle de temps écoulé entre l'apparition de lumière et la perception du son lui-même par l'oreille. La vitesse du son dans l'air une fois connue, on peut s'en servir facilement pour la détermination des distances. En observant par exemple l'intervalle de temps écoulé entre l'apparition de l'éclair, et l'instant où le son du coup de tonnerre arrive à l'oreille, on détermine la distance à laquelle la décharge électrique a eu lieu. Le danger d'être frappé par la foudre n'existe que dans l'intervalle très-court entre l'éclair et le bruit du tonnerre.

Abordons maintenant un des points les plus délicats de toute la théorie du son. La vitesse du son dans l'air a été obtenue par des expériences directes; mais, lorsqu'on connaît la densité et l'élasticité de l'air, on peut calculer théoriquement, sans aucune expérience, la vitesse de propagation d'une onde sonore dans l'air. Sir Isaac Newton fit ce calcul, et il trouva pour la vitesse du son, à la température de la glace fondante, 279 mètres par seconde (916 pieds anglais). Cette valeur est plus petite d'un sixième environ que celle donnée par l'observation, et pour expliquer ce désaccord on a mis en avant les plus curieuses suppositions. Newton, lui, hasarda cette conjecture que c'était uniquement dans le passage d'une molécule d'air à la suivante que le son exigeait un certain *temps* pour sa transmission, et que dans l'intérieur de chaque molécule la transmission était *instantanée;* il admit en outre que, sur la ligne de transmission du son, l'espace occupé par les molécules d'air comptait pour un sixième de la longueur totale; il corrigeait ainsi d'un sixième la vitesse théorique en défaut. Cette explication était trop artificielle et trop ingénue pour pouvoir être adoptée. On eut donc recours à d'autres théories, qui ne valaient pas mieux, et le grand mathématicien français Laplace trouva le premier le mot de l'énigme. Essayons de nous initier complétement à sa savante solution de ce difficile problème.

Prenons un fort cylindre de verre TU (*fig.* 7), calibré avec soin, parfaitement poli à l'intérieur, fermé en bas et ouvert en haut, muni d'un piston fermant tout accès à l'air. En poussant ce piston, nous comprimons

Fig. 7.



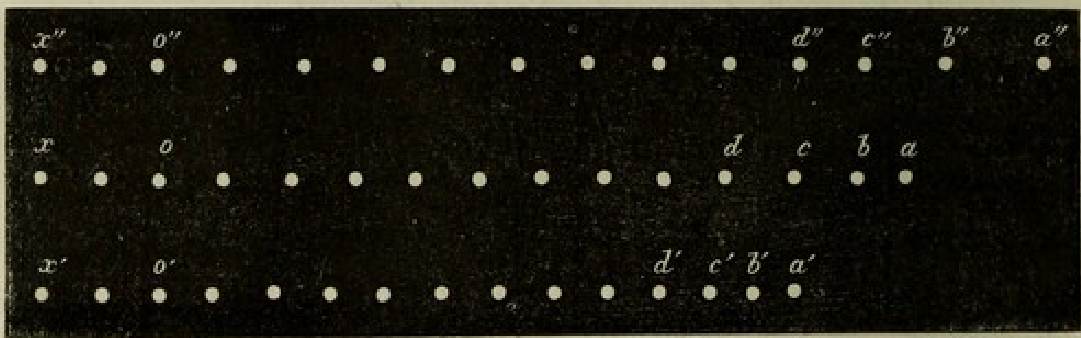
l'air situé au-dessous, et cette compression dégage de la chaleur. Si nous fixons au fond du piston un morceau d'amadou, il s'enflammera par la chaleur née de la compression. Si, après avoir plongé un morceau de coton dans du bi-sulfure de carbone, et l'avoir fixé au piston, nous l'introduisons brusquement, nous voyons briller dans le tube un éclair de lumière dû à l'ignition de la vapeur du bi-sulfure de carbone. Cette expérience prouve que la compression de l'air engendre de la chaleur. On peut démontrer par une autre expérience que la dilatation de l'air produit du froid. Ce réservoir en cuivre contient de l'air très-fortement condensé; tournons le robinet, l'air intérieur se répand au dehors; ce qui reste s'est dilaté, et le thermomètre qui plonge dans le réservoir annonce un refroidissement.

Vous avez sans doute encore présent à la mémoire ce que nous avons dit du mode de propagation des ondes sonores. A mesure que l'impulsion marche en avant, elle presse les molécules d'air l'une contre l'autre, et cette compression produit deux effets très-différents. Premièrement, elle augmente l'élasticité de l'air en accroissant sa densité. Secondement, elle augmente cette même élasticité par la chaleur qu'elle développe. Newton ne tint compte que du changement de densité ; il négligea complétement l'augmentation d'élasticité due à la seconde des causes ci-dessus énumérées. En outre, et au-dessus de l'élasticité introduite dans le calcul de Newton, nous avons donc l'élasticité additionnelle due aux changements de température causés par le son lui-même. Lorsque l'on tient compte de ces deux élasticités, les vitesses calculée et observée s'accordent parfaitement.

Ici toutefois, si nous n'y prenions garde, nous tomberions dans une grave erreur. Quand on s'attaque aux problèmes de la nature, l'esprit doit toujours être sur le qui-vive pour en saisir toutes les conditions, sans cela nous verrions bientôt nos conceptions démenties par les faits. L'augmentation de vitesse due aux changements de température déterminés par l'onde sonore elle-même est totalement différente de celle qui serait due à un échauffement général de la masse de l'air. La température *moyenne* de l'air n'est pas changée par le passage de l'onde. Chaque onde condensée est suivie d'une onde raréfiée ; or, la raréfaction abaisse autant la température que la condensation l'avait élevée. En supposant donc l'atmosphère ainsi partagée en condensations et raréfactions accompagnées de leurs températures respectives, un son qui traversera cet atmosphère sera autant retardé dans les portions raréfiées qu'accéléré dans les portions condensées, et la vitesse moyenne n'aura pas été modifiée par cette distribution de température.

D'où peut donc venir l'augmentation de vitesse signalée par Laplace? Les développements dans lesquels nous allons entrer exigent toute votre attention si vous voulez bien saisir le nœud de la difficulté. Quand l'air est comprimé, il diminue de volume, et quand la pression diminue, son volume augmente. La force qui résiste à la compression ou qui produit la dilatation est la force élastique de l'air. Ainsi, une pression extérieure pousse les molécules de l'air les unes contre les autres, tandis que leur force élastique tend à les éloigner les unes des autres ; les molécules sont en équilibre quand ces deux forces sont égales. Voilà comment la pression extérieure est la mesure de la force élastique. Supposons que dans la figure 8, la rangée de points intermédiaires représente une

Fig. 8.



suite de molécules d'air à l'état de repos entre les points a et x. Par suite de la force élastique exercée entre les molécules, si l'on en écarte une de sa position de repos, son mouvement se transmettra à toute la série. Supposons donc que la molécule a reçoive d'un corps en vibration, d'un diapason par exemple, une impulsion qni la porte vers x, et qu'elle vienne en conséquence occuper la position représentée par a' dans la troisième ligne. A l'instant où son excursion commence, le mouvement de a se communique à b. Dans l'instant suivant, b le communique à c, et ainsi de suite. Enfin, lorsque la molécule a est arrivée en a', au terme de son excursion, le mouvement s'est communiqué de la sorte jusqu'en un certain point o', plus ou moins distant de a'. La série entière des molécules entre a' et o' est alors dans un état de condensation. La distance $a'o'$, ou l'espace parcouru par la transmission du mouvement dans l'excursion de a en a', dépend de la force élastique qui est exercée entre les molécules. Considérons deux molécules contiguës quelconques, par exemple a et b. On peut se représenter la force élastique exercée entre elles comme un ressort à boudin, et il est évident que, plus ce ressort sera mou, plus lente sera la communication du mouvement de a à b ; que plus, au contraire, ce ressort sera *roide*, plus cette communication sera rapide. Ce qui est vrai de a et b, l'est également de tous les couples de molécules de la série entre a et o. Cela posé, le ressort entre deux molécules consécutives devient plus roide par l'action de la chaleur dégagée sur la ligne de condensation ; donc la transmission du son est accélérée par cette chaleur. Si nous revenons à notre vieille expérience de la rangée des petits garçons, le dégagement de chaleur dont nous venons de voir les effets pourra être représenté, dans l'acte de pousser son voisin, par un accroissement de rigidité musculaire dans les bras des enfants, qui rende plus énergique et plus prompte la transmission successive des mouvements. La portion condensée d'une onde sonore se propage de la manière que nous venons de dire, et la rapidité de cette propagation est évidemment augmentée par la chaleur qui se développe dans la condensation des molécules.

Examinons maintenant le mode de propagation de la portion raréfiée ou dilatée de l'onde sonore. Supposons, comme tout à l'heure, que la rangée médiane ax représente toujours les molécules d'air en équilibre sous la pression atmosphérique, et que la molécule a soit subitement entraînée vers la droite, de manière à venir en a'' dans la rangée supérieure : a'' est immédiatement suivie de b'' ; b'', de c''; c'', de d'', etc.; la raréfaction se propage ainsi en arrière et atteint o'' dans le temps que a met à passer en a''. Mais pourquoi la molécule o'' suit-elle la molécule a'' dans son déplacement rétrograde? Évidemment, parce que la force élastique exercée entre a'' et b'' est moindre que celle exercée entre b'' et c''. De fait, la molécule b'' est entraînée à la suite de a'' par une force égale à la différence des deux élasticités entre a'' et b'', b'' et c''. La même remarque s'applique au mouvement de c'' à la suite de b'', de d'' à la suite de c'', etc., en un mot, au déplacement de chaque molécule à la suite de celle qui la précède. Plus la différence de deux forces élastiques à droite et à gauche d'une molécule sera grande, plus elle sera prompte à suivre celle qui la précède. Voyons quelle sera l'influence du froid produit par la raréfaction. A la diminution de la force élastique entre a'' et b'' par l'écartement plus grand de a'', vient s'ajouter la diminution due à l'abaissement de température. Le froid engendré accroît la différence de force élastique dont dépend la propagation de la raréfaction. Nous le voyons donc : parce que la chaleur développée dans la condensation accélère la condensation, parce que le froid dégagé dans la raréfaction augmente la rapidité de la raréfaction, l'onde sonore, qui consiste en une condensation et une raréfaction, doit avoir sa vitesse de propagation augmentée par la chaleur et le froid qui se développent dans sa propagation.

Il importe de remarquer que la distance $a'o'$, à laquelle le mouvement s'est propagé pendant que a allait de a en a', peut être beaucoup plus grande que la distance aa' entre les deux positions de la molécule a. L'excursion de a peut n'être qu'une petite fraction de millimètre, tandis que la distance à laquelle le mouvement s'est transmis pendant que a allait en a' peut être de plusieurs mètres. Si ces considérations laissent encore quelques doutes dans vos esprits, ils se dissiperont peu à peu.

Ces éclaircissements partiels donnés, abordons une autre région du domaine de la philosophie naturelle, en apparence très-éloignée, mais qui s'y rattache assez pour qu'on puisse affirmer que l'éloignement n'est pas la discontinuité. Concevons qu'une certaine quantité d'air à la température 0°, contenue dans un vase clos à parois inextensibles, soit élevée à la température de 1°; concevons que la même élévation de température ait lieu pour une masse égale d'air contenue dans un vase qui lui permette de se dilater en s'échauffant, la pression de l'air restant constante pendant sa dilatation : la quantité de chaleur dépensée dans les deux cas ne sera pas la même. L'une exprime ce qu'on appelle la *chaleur spécifique de l'air à volume constant;* l'autre, la *chaleur spécifique de l'air à pression constante*, et la seconde est plus grande que la première. Nous trouverons ici un exemple frappant des liens qui unissent des phénomènes en apparence très-étrangers les uns aux autres : des vitesses calculées et observées du son dans l'air, nous pouvons déduire le rapport de ces deux chaleurs spécifiques. Si l'on forme les carrés des deux nombres qui représentent la vitesse calculée et la vitesse observée, et qu'on divise le plus grand des deux carrés par le plus petit, on obtient le rapport cherché. Appelant C^v la chaleur spécifique à volume constant, et C^p la chaleur spécifique à pression constante, V la vitesse calculée de Newton, et V' la vitesse observée; Laplace a prouvé que

$$\frac{C^p}{C^v} = \frac{V'^2}{V^2}.$$

Remplaçant V et V' par leurs valeurs numériques, et faisant le calcul, on trouve

$$\frac{C^p}{C^v} = 1{,}42.$$

Ainsi, sans connaître aucune des deux chaleurs spécifiques de l'air à volume constant et à pression constante, Laplace trouva que le rapport de la plus grande à la plus petite était 1,42. On conclut de la formule précédente que la vitesse observée du son est égale à la vitesse calculée, multipliée par la racine carrée de ce même rapport 1,42.

Mais il est une hypothèse liée à la détermination de ce rapport et qui demande quelques éclaircissements. On suppose que la chaleur développée par la compression *reste tout entière dans la portion condensée de l'onde,* qu'elle s'y applique à augmenter l'élasticité, et qu'aucune portion de cette chaleur ne se dissipe par rayonnement. Si l'air avait un grand pouvoir rayonnant, cette hypothèse ne subsisterait pas. La chaleur que dégage la condensation ne pourrait plus rester dans la portion condensée ; elle serait rayonnée dans tous les sens et irait se loger, pour sa plus grande part, dans la région de l'onde refroidie et raréfiée, douée d'une puissance d'absorption proportionnelle. Il en résulterait une tendance directe à l'égalité de température entre les deux moitiés de l'onde, et il ne pourrait plus être question de l'augmentation de vitesse exigée par la correction de Laplace.

Par conséquent, la question de l'exactitude de ce rapport implique cette autre question en apparence complétement étrangère : l'air atmosphérique possède-t-il un pouvoir rayonnant sensible ? Si le rapport est exact, l'absence réelle de pouvoir rayonnant dans l'air est démontrée. Mais comment pourrons-nous acquérir l'assurance que le pouvoir rayonnant de l'air est pratiquement nul ? Par un mode de raisonnement qui met, en outre, en évidence les rapports intimes des agents naturels. Ce rapport, discuté par un homme de génie, je pourrais ajouter par un martyr de la science, Mayer, l'amena à concevoir, relativement à la corrélation et aux dépendances mutuelles des forces de la nature, des idées plus claires et plus élevées que celles émises par tous les physiciens qui l'avaient précédé. Mayer fut le premier à voir, dans le rapport dont il s'agit, une preuve de *destruction* de chaleur; il fut le premier qui découvrit que l'excès 0,42 de la chaleur spécifique de l'air à pression constante sur la chaleur spécifique à volume constant, représente la quantité de chaleur consommée par le *travail* accompli par l'air dans l'acte de sa dilatation. Plus tard, en supposant une masse confinée latéralement, ne pouvant se dilater que dans la direction verticale et assujettie à soulever simplement le poids de l'atmosphère, Mayer entreprit de calculer la quantité précise de chaleur dépensée dans l'acte de l'élévation de ce poids ou d'un poids équivalent quelconque. Il cherchait ainsi à déterminer l'*équivalent mécanique* de la chaleur. Ses raisonnements, dans la combinaison des idées, étaient plus clairs que le jour; mais, pour passer aux nombres, il était réduit aux expériences de son temps.

Ses résultats, quoique approximativement corrects, n'avaient pas l'exactitude de ceux que l'on a déduits plus tard des expériences incomparables de M. Regnault, faites avec les appareils perfectionnés que le génie des constructeurs a su réaliser plus tard. Sans rien changer aux idées et aux raisonnements de Mayer ni à l'édifice de ses calculs, il suffit d'introduire dans la formule les données plus vraies de la science moderne, pour arriver à la valeur exacte de l'équivalent mécanique de la chaleur.

Mais comment sommes-nous en mesure de parler avec tant de confiance de l'exactitude de cet équivalent? Par là longue série des travaux d'un savant anglais qui étudia ces questions en même temps que Mayer, et qui, animé de ce même feu sacré du génie créateur, qui avait inspiré son célèbre confrère allemand, se trouva de plus en mesure de oumettre à l'épreuve de l'expérience les inspirations de son génie. Les recherches immortelles de M. Joule démontrèrent, pour la première fois, d'une manière certaine, la convertibilité réciproque du travail mécanique et de la chaleur. « L'*équivalent de Joule*, » c'est ainsi qu'on l'appelle à bon droit dans un juste sentiment de reconnaissance commandé par la somme considérable de travail déployé dans sa détermination, est à peu près identique à celui de Mayer.

Jetons maintenant un regard sur le champ que nous avons parcouru, sur le curieux labyrinthe de raisonnements et d'expériences que nous avons traversé. Nous sommes partis des deux vitesses du son dans l'air atmosphérique, la vitesse calculée et la vitesse observée. Nous avons rencontré sur notre chemin l'hypothèse particulière de Laplace, qui déduisait de ces deux vitesses le rapport de la chaleur spécifique de l'air à pression constante à sa chaleur spécifique à volume constant; nous avons vu ensuite Mayer partir de ce rapport pour calculer l'équivalent mécanique de la chaleur; et, enfin, M. Joule conclure directement la valeur du même rapport de ses expériences sur les frottements de corps solides ou liquides. Et quel est le résultat de cette discussion? Les expériences de M. Joule prouvent que Mayer était dans le vrai; elles prouvent en même temps que le rapport déterminé par Laplace est le vrai rapport de la nature, et que, par conséquent, l'air atmosphérique ne possède pas à un degré sensible le pouvoir de rayonner la chaleur. Au premier abord, il semble qu'il y ait une distance incommensurable entre l'agitation d'une masse d'eau ou le frottement de plaques de fer l'une contre l'autre, et le rayonnement des atomes de notre atmosphère; nos raisonnements ont fait disparaître cette distance et démontré l'étroite solidarité de ces divers phénomènes. Mais un vrai physicien ne saurait se contenter d'une déduction, lorsqu'il lui est possible de prouver ou de nier par l'expérience le résultat auquel il est parvenu. Les raisonnements qui précèdent devaient trouver leur confirmation dans des expériences ayant pour but de soumettre à l'épreuve le pouvoir rayonnant de l'atmosphère. Lorsque l'épreuve a été faite, on a vu que le raisonnement et l'expérience étaient parfaitement d'accord, que l'air était dénué de tout pouvoir sensible de rayonnement et d'absorption.

Une remarque critique encore à l'adresse de ceux qui font des expériences sur la transmission du son à travers les gaz. Du temps de Laplace, et même longtemps encore après, on pensait que tous les gaz, sans exception, n'avaient qu'un pouvoir nul ou négligeable de rayonnement. Mais il est bien établi aujourd'hui qu'il n'en est pas ainsi, et il serait téméraire d'admettre *à priori*, dans le cas de l'ammoniaque, par exemple, de la vapeur d'eau, de l'acide sulfureux et du gaz oléfiant, que leur énorme pouvoir rayonnant puisse se prêter à l'application de la formule de Laplace. C'est un devoir pour nous de rechercher si les rapports des deux chaleurs spécifiques de ces gaz, déduits de la vitesse du son, sont les rapports véritables de la nature, et si, en supposant qu'on pût arriver à cette valeur exacte par d'autres méthodes, sa racine carrée, multipliée par la vitesse calculée, donnerait la vitesse observée. Dès l'instant où la chaleur se produit tout d'abord dans la condensation, et le froid dans la dilatation d'une onde sonore au sein de ces gaz, le pouvoir rayonnant entre en jeu pour faire disparaître la différence des températures. La portion condensée de l'onde ne gagne pas en force élastique tout ce qu'elle devrait gagner; la portion dilatée ne perd pas tout ce qu'elle devrait perdre, et l'on conçoit que, si le pouvoir rayonnant vient à dépasser une certaine limite, la vitesse du son pourra différer notablement de la valeur donnée par la formule de Laplace, pour se rapprocher de celle qui dérive de la formule plus simple de Newton.

Pour compléter ce résumé des notions acquises sur la transmission du son, empruntons quelques tableaux aux excellentes recherches de Dulong, qui suivit dans ses expériences une méthode expérimentale dont nous aurons à parler plus tard.

VITESSE DU SON DANS PLUSIEURS GAZ, A LA TEMPÉRATURE DE 0°.

Air................	332^{m},8
Oxygène...........	317^{m},0
Hydrogène..........	1 269^{m},2
Acide carbonique.....	261^{m},5
Oxyde de carbone....	337^{m},4
Protoxyde d'azote....	261^{m},8
Gaz oléfiant.........	313^{m},9

Théoriquement, les vitesses du son dans l'oxygène et l'hydrogène devaient être inversement proportionnelles aux racines carrées des densités de ces deux gaz, et nous voyons que cette conséquence de la théorie est confirmée par l'expérience. L'oxygène pesant 16 fois autant que l'hydrogène, et la racine carrée de 16 étant 4, la vitesse du son dans l'hydrogène doit être quadruple de la vitesse du son dans l'oxygène; celle-ci étant 317, la vitesse dans l'hydrogène devrait être 1268; l'expérience la fait égale à 1269,2.

La vitesse du son dans les liquides peut être déterminée théoriquement, de même que la vitesse dans l'air l'a été par Newton; car on évalue sans peine la densité des liquides, et l'on peut mesurer leur élasticité en les soumettant à la compression. Pour l'eau en particulier, les vitesses calculées et observées sont assez concordantes pour qu'il soit permis d'en conclure que les changements de température produits par l'onde sonore n'ont pas d'influence sensible sur sa vitesse. Par une série d'expériences mémorables faites sur le lac de

Genève, Colladon et Sturm ont trouvé, pour la vitesse du son dans l'eau, 1435 mètres par seconde. Par un procédé d'expérimentation que nous ne pourrons comprendre que plus tard, feu M. Wertheim a trouvé, pour la vitesse du son dans divers liquides, les nombres du tableau suivant :

VITESSE DU SON DANS DIVERS LIQUIDES.

NOMS DES LIQUIDES.	TEMPÉRATURE	VITESSE.
	Degrés cent.	Mètres.
Eau de rivière (Seine)..........	15	1436,7
« «	30	1528,0
« «	60	1724,2
Eau de mer (artificielle).........	20	1453,2
Solution de sel commun.........	18	1564,2
Solution de sulfate de soude.....	20	1583.1
Solution de carbonate de soude...	22	1594,1
Solution de nitrate de soude.....	21	1669,4
Solution de chlorure de calcium...	23	1979,0
Alcool ordinaire...............	20	1285,6
Alcool rectifié......	23	1159,5
Essence de térébenthine.........	24	1212,0
Éther sulfurique...............	0	1161,3

Ce tableau nous montre que le son traverse les liquides avec des vitesses très-variables ; que la dissolution d'un sel dans l'eau accroît sa vitesse, et que le sel qui produit au plus haut degré cette accélération de vitesse est le chlorure de calcium. Ces expériences nous apprennent aussi que, dans l'eau comme dans l'air, la vitesse augmente avec l'élévation de la température. Par exemple, à la température de

15°, la vitesse dans l'eau de Seine est de 1436 mètres, tandis qu'à 30° elle est de 1528, et à 60° de 1724 par seconde.

Nous avons dit que de la compressibilité d'un liquide on peut conclure, par des mesures convenablement prises, la vitesse du son qui lui correspond. Réciproquement, la vitesse du son dans un liquide, lorsqu'elle est connue, peut servir à donner sa compressibilité. Wertheim a comparé une série de compressibilités déduites de ses expériences sur le son avec celles que M. Grassi avait mesurées directement. L'accord des nombres obtenus, mis en évidence par le tableau suivant, est une confirmation frappante de l'exactitude de la méthode suivie par Wertheim :

	COMPRESSIBILITÉ CUBIQUE	
	déduite des vitesses du son de Wertheim.	déduite des expériences directes de M. Grassi.
Eau de mer................	0,0000467	0,0000436
Solution de sel commun......	0,0000349	0,0000321
Id. de carbonate de soude.	0,0000337	0,0000297
Id. de nitrate de soude...	0.0000301	0,0000295
Éther sulfurique............	0,0001002	0,0001110
Alcool rectifié..............	0,0000947	0,0000991

Plus un liquide offre de résistance à la compression, plus son retour à son volume primitif est énergique et prompt quand il cesse d'être comprimé. Par conséquent, moins un liquide est compressible, plus il est élastique, et, toutes choses égales d'ailleurs, plus est grande la vitesse du son qui le traverse.

Nous avons maintenant à considérer la transmission du son dans les solides. Ici, en règle générale, l'élasticité à densité égale est plus grande que dans les liquides, et par suite la propagation du son est plus rapide. Voici les résultats obtenus par Wertheim pour différents métaux :

VITESSE DU SON DANS LES MÉTAUX.

NOM DU MÉTAL.	A 20°	A 100°	A 200°
	Mètres.	Mètres.	Mètres.
Plomb	1228,3	1204,3	—
Or	1742,5	1719,0	1734,6
Argent	2707,0	2639,0	2477,1
Cuivre	3555,8	3292,4	2953,5
Platine	2686,8	2569,7	2462,5
Fer	5127,3	5299,4	4719,2
Fil de fer (ordinaire)	4916,4	5098,6	—
Acier fondu	4985,6	4925,0	4788,1
Fil d'acier (anglais)	4715,3	5242,9	4997,0
Fil d'acier	4883,8	5011,8	—

Ce tableau met en évidence l'influence de la température sur la vitesse du son dans les métaux. Le plus souvent, la vitesse est diminuée quand la température augmente ; le fer, cependant, apporte une exception frappante à cette règle, mais il ne fait exception qu'entre certaines limites. En effet, pendant qu'une élévation de température de 20° à 100° fait tomber, pour le cuivre, la vitesse de 3555,8 à 3292,4, cette même élévation produit, dans le cas du fer, un accroissement de vitesse de 5127,3 à 5298,6 ; mais entre 100° et 200° la vitesse dans le fer diminue et tombe à 4719,2. Dans le fer donc, l'élasticité est augmentée d'abord par la chaleur, elle est diminuée ensuite. On constate par une expérience instructive la différence de vitesse dans le fer et dans l'air. Choisissez une de ces plus longues barres de fer horizontales dont on se sert pour faire des clôtures dans Hyde-Park, et faites qu'un aide frappe à l'une des extrémités de la barre pendant que vous tenez votre oreille appliquée contre la barre à une distance considérable. Vous entendrez successivement deux sons : le premier transmis à travers le fer, le second transmis à travers l'air. M. Biot avait déjà constaté ce fait dans ses expériences sur les tuyaux en fer des conduites d'eau de Paris.

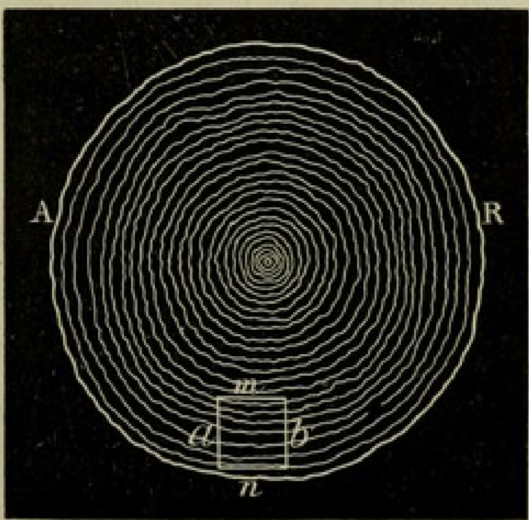
La transmission du son dans l'intérieur d'un corps solide dépend, dans une certaine mesure, de la disposition et de l'arrangement des molécules qui le constituent. Si le corps est une masse homogène, sans structure aucune, le son s'y propage avec une égale facilité dans toutes les directions; mais il en est autrement lorsque le corps possède une structure particulière et définie, comme un cristal dans le règne inorganique, comme un tronc d'arbre dans le règne organique. Cette différence d'action s'étend à d'autres agents que le son. Si l'on soumet, par exemple, une sphère de bois à l'action d'un aimant, elle n'est pas également influencée dans toutes les directions : elle est repoussée partout par le pôle de l'aimant, mais la répulsion est plus forte lorsque l'aimant se présente dans la direction des fibres. La chaleur aussi est conduite avec des facilités plus ou moins grandes dans des directions différentes à travers le bois; elle passe plus librement le long des fibres, et, dans la transmission oblique ou transversale aux fibres, le pouvoir conducteur du bois n'est pas le même dans toutes les directions. La chaleur passe plus librement encore transversalement aux couches concentriques que suivant ces couches elles-mêmes. Le bois possède donc trois axes inégaux de conductibilité calorifique, et ces axes coïncident avec les axes d'élasticité découverts par Savart. MM. Wertheim et Chevandier ont déterminé la vitesse du son dans le sens de ces trois axes, et ils ont obtenu les résultats suivants :

VITESSE DU SON DANS LE BOIS.

NOM DU BOIS.	SUIVANT les fibres.	TRANSVERSALEMENT aux couches.	SUIVANT les couches.
Acacia..........	4714	1475	1352
Sapin...........	4638	1335	784
Hêtre...........	3342	1837	1415
Chêne...........	3847	1535	1289
Pin.............	3322	1405	794
Orme............	4119	1422	1013
Sycomore........	4462	1498	1136
Frêne...........	4667	1390	1262
Aulne...........	4665	1369	1043
Érable..........	4106	1538	1037
Peuplier........	4282	1402	1050

Coupons dans l'aubier d'un arbre d'assez belles dimensions un cube dans lequel les anneaux circulaires puissent, sur une petite longueur, être regardés comme des lignes droites. AR (*fig.* 9), étant la coupe de l'arbre, la vitesse du son dans

Fig. 9.



la direction mn, à travers le cube, sera plus grande que dans la direction *ab*. Le tableau qui précède met très-nettement en évidence la grande influence de la structure moléculaire sur la transmission du son. Le plus grand nombre des cristaux présentent des différences de même genre. Au sein de la majorité des cristaux, les molécules dans leur arrangement sont plus ou moins rapprochées dans les différentes directions, et, partout où le degré de rapprochement varie, on observe des variations dans la transmission et la manifestation de la lumière, de l'électricité, du magnétisme et du son.

Terminons cet exposé des faits relatifs à la transmission du son dans les gaz, les liquides et les solides par une fière et belle citation des livres d'un admirable penseur, le docteur Robert Hooke. Il convient d'autant plus de la rappeler, que le voisinage dangereux de Newton n'a pas peu contribué à effacer le nom et la réputation de cet homme extraordinaire. On remarquera que ce passage contient très-explicitement la théorie du stéthoscope ; et il est très-peu d'autres exemples de ces élans de l'imagination scientifique qui, chez les grands chercheurs de la nature, sont à la fois et le précurseur et l'associé de l'expérience.

« Il ne serait pas impossible, dit Hooke, de découvrir les modes de mouvement et d'action des corps par les sons qu'ils font entendre. De même que, dans une horloge, nous entendons le battement du balancier, la rotation des roues, le frottement des engrenages, les chocs des marteaux et beaucoup d'autres bruits, ne pourrait-on pas découvrir les mouvements des parties intérieures des corps, animaux, végétaux ou minéraux, par le son qu'ils rendent, reconnaître les travaux qui s'accomplissent dans les divers ateliers du corps humain, et apprendre ainsi quels sont les instruments ou les outils qui fonctionnent mal, quels travaux s'exécutent normalement à certains instants, anormalement dans d'autres, etc.? Pourquoi, dans les plantes et les végétaux, ne découvrirait-on pas, à l'aide du bruit produit, les pompes qui font monter la sève, les soupapes qui l'interceptent, son suintement d'un organe à l'autre, et ainsi de suite? Je pourrais aller plus loin, mais je sens la rougeur me monter au front, quand je considère avec quel dédain la plupart des hommes accueilleront ce que je vais dire. N'importe; il est plus encourageant pour moi de ne pas regarder ces choses comme absolument impossibles, alors même qu'elles exciteraient le rire de la généralité des hommes et que je leur semblerais fou, insensé et fantasque. Croire ces choses impossibles n'augmenterait pas mes connaissances, tandis que, croyant à leur possibilité, je trouverai peut-être l'occasion de prendre note de certains faits qu'un autre ne daignera pas même regarder, parce qu'il les jugera complétement inutiles. J'ai trouvé un peu plus que de l'encouragement en constatant par l'expérience, que j'entendais parfaitement les battements du cœur de l'homme; comme c'est chose commune d'entendre le va-et-vient des gaz dans les entrailles ou dans d'autres petits vaisseaux; comme l'état morbide des poumons se révèle par le bruit de la respiration, le rhume de cerveau par le sifflement du nez, le déplacement des jointures par un claquement et la sensation du mouvement des organes se déplaçant l'un l'autre. J'ai été plus encouragé encore, quand j'ai reconnu qu'on entend le bruit crépitant de l'action d'un corrosif en opération, celui du feu dans l'acte de la dissolution, le murmure de l'eau bouillante, le son d'une cloche après que ses vibrations ont cessé d'être sensibles à l'œil: car, pour moi, ces derniers mouvements ne diffèrent des premiers que *du plus au moins;* et par conséquent, pour les rendre sensibles, il suffirait, soit de les augmenter, soit de rendre plus délicat et plus puissant l'organe qui doit les saisir. »

RÉSUMÉ DE LA LEÇON I.

Le bruit d'une explosion se propage dans l'air sous forme d'onde ou de pulsation.

Cette onde, quand elle rencontre la membrane du tympan, la fait vibrer ; ses vibrations se communiquent au nerf auditif, et, transmises le long de ce nerf, elles vont au cerveau, qui reçoit la sensation du son.

Une onde sonore se compose de deux portions contiguës : dans la première, l'air est condensé, et dans la seconde, il est raréfié.

La propagation d'une onde sonore n'est pas un mouvement de translation des molécules d'air, qui à chaque instant font partie de cette onde : pendant le passage de l'onde, chaque molécule d'air ne fait qu'une très-petite excursion de va-et-vient, en avant et en arrière.

La longueur de cette excursion se nomme l'*amplitude* de la vibration.

Le son ne peut pas se propager dans le vide.

Le son se réfléchit exactement comme la lumière ; il est aussi réfracté comme la lumière, et peut comme elle être condensé par des lentilles convenablement choisies.

Le son peut aussi s'infléchir, et l'onde sonore contourner des obstacles ; mais ces obstacles éteignent en partie le son ou lui font ombre.

Les échos sont produits par la réflexion d'ondes sonores.

Relativement au son et au milieu qu'il traverse, quatre choses sont à considérer : l'intensité et la vitesse du son, l'élasticité et la densité du milieu.

L'intensité du son est proportionnelle au carré de l'amplitude de la vibration, définie comme nous l'avons dit.

Elle est aussi proportionnelle au carré de la vitesse maximum de chaque molécule d'air en vibration.

Lorsque le son émane d'un corps de petites dimensions, son intensité diminue comme le carré de la distance au corps sonore.

Si l'onde sonore est confinée dans un tube dont la surface intérieure est polie, le son s'y propage à de grandes distances sans perdre sensiblement de son intensité.

La vitesse du son dans l'air dépend du rapport de l'élasticité de l'air à sa densité. Plus l'élasticité de l'air est grande, plus la propagation du son est rapide, plus la densité de l'air est grande, plus la propagation du son est lente.

La vitesse est directement proportionnelle à la racine carrée de l'élasticité, et inversement proportionnelle à la racine carrée de la densité.

Donc, si l'élasticité et la densité varient dans le même rapport, l'une neutralisera ou compensera l'autre ; la vitesse du son restera la même.

La loi de Mariotte prouve que la densité et l'élasticité de l'air varient toujours dans le même rapport, et, par conséquent, que la vitesse du son dans l'air est indépendante de la densité de l'air.

Mais, pour que cette loi subsiste, il faut que la température soit la même dans l'air condensé et dans l'air raréfié.

L'intensité du son dépend de la densité de l'air au sein duquel il est produit, et nullement de celle de l'air où il est entendu.

La vitesse du son dans l'air, à la température 0°, est de 332 mètres par seconde ; elle augmente d'environ 6 décimètres par chaque degré ajouté à cette température.

Donc, étant donnée la vitesse du son dans de l'air, la température de cet air peut être facilement calculée.

On peut déterminer la distance du point où l'on tire le canon, ou du lieu de décharge de la foudre, d'après l'intervalle de temps observé entre l'apparition de la lumière et l'arrivée du son.

Il résulte de ce qui précède que, si des soldats rangés en cercle déchargent leurs fusils au même instant, pour une personne placée au centre du cercle, toutes les décharges n'en feront qu'une.

Mais si les hommes sont placés sur une ligne droite, un observateur placé sur la même ligne, au delà de l'une des extrémités de la rangée, entendra, au lieu d'un son unique, un roulement plus ou moins prolongé.

La décharge de la foudre sur les divers points d'un nuage de très-grande longueur peut, de cette manière, produire le roulement prolongé du tonnerre ; toutefois, les roulements du tonnerre sont dus, en partie du moins, aux échos formés par les nuages.

Chacun expliquera sans difficulté une multitude d'autres faits analogues, en tenant compte du temps qu'exige le son pour traverser une grande longueur d'air. Il comprendra, par exemple, pourquoi la hache du bûcheron frappe le bois avant l'instant où le coup est entendu par un observateur éloigné. Une longue file de soldats s'avançant, musique en tête, sur une grande route, ne peuvent pas marcher en cadence ou au pas, parce que les notes musicales n'arrivent pas simultanément à l'oreille des soldats placés en avant et en arrière.

La température de l'air est supérieure dans la portion condensée de l'onde, inférieure dans la portion dilatée à la température moyenne de l'air.

Le changement de température produit par le passage de l'onde augmente virtuellement l'élasticité de l'air, et fait que la vitesse du son est plus grande d'un sixième environ qu'elle ne le serait si la température n'avait pas changé.

La vitesse calculée théoriquement par Newton, qui ne tenait pas compte des changements de température, était de $279^{m},2$.

Laplace prouva que, pour obtenir la vitesse réelle ou observée, il suffit de multiplier la vitesse de Newton par la racine carrée du rapport de la chaleur spécifique de l'air à pression constante, à sa chaleur spécifique à volume constant.

Réciproquement, du rapport des deux vitesses, observée et calculée, on peut conclure le rapport des deux chaleurs spécifiques.

L'équivalent mécanique de la chaleur peut se déduire à son tour de ce même rapport; sa valeur ainsi calculée par Meyer se trouve être celle que Joule a conclue de l'expérience directe.

Cette coïncidence conduit à conclure que l'air atmosphérique ne possède pas à un degré sensible le pouvoir de faire rayonner la chaleur. Des expériences directes sur le pouvoir rayonnant calorifique de l'air confirment cette conclusion.

La vitesse du son dans l'eau est plus que quadruple de sa vitesse dans l'air.

La vitesse du son dans le fer est dix-sept fois sa vitesse dans l'air.

La vitesse du son le long des fibres du bois de sapin est dix fois sa vitesse dans l'air.

La cause de cette grande supériorité de vitesse est que les rapports des élasticités aux densités pour les liquides, les métaux et les bois, ont une valeur bien supérieure à celle du rapport de l'élasticité de l'air à sa densité.

La vitesse du son dépend aussi de la structure moléculaire. Dans le bois, par exemple, la vitesse du son n'est pas la même suivant toutes les directions.

LEÇON II.

Distinction entre le bruit et le son musical. — Production d'un son musical par impulsions périodiques, et d'un bruit par impulsions non périodiques. — Production des sons musicaux par de petits chocs. — Leur production par insufflation. — Définition de la hauteur du son ou du ton en musique. — Vibrations d'un diapason; leur représentation graphique sur une glace noircie par la fumée. — Expression optique des vibrations d'un diapason. — Description de la syrène. — Limites de l'ouïe ; le plus élevé et le plus bas des sons qu'elle perçoit. — Détermination du nombre des vibrations par la syrène. — Détermination des longueurs des ondes sonores. — Longueurs d'onde de la voix humaine (chez l'homme et chez la femme). — Transmission des sons musicaux par les liquides et les solides.

Dans la dernière leçon, nous avons considéré la propagation dans l'air d'une simple onde sonore dont l'origine avait été l'explosion d'un petit ballon rempli d'un mélange d'oxygène et d'hydrogène. On engendrait ainsi un son de durée momentanée. Nous avons aujourd'hui à considérer les sons continus, et à établir tout d'abord la distinction physique entre le bruit et un son musical. A n'en juger que par nos sensations, nous savons tous parfaitement faire la différence entre ces deux choses. Mais il faut aller plus loin, rechercher les causes de ces sensations, et découvrir les conditions du mouvement de l'air extérieur, qui font que, dans un cas, ce mouvement se résout en bruit, et dans l'autre, en musique.

Nous savons déjà que ce qu'on entend par l'*intensité* ou la *force du son*, n'est en dehors de nous que l'étendue des excursions ou l'*amplitude* des oscillations des molécules d'air mises en vibration. Toutes les autres impressions dont nous avons la conscience, ont de même leur cause hors de nous, et cette cause est purement la forme ou l'état de l'atmosphère.

Si, par exemple, nous pouvions apercevoir les molécules d'air à travers lesquelles se propage une voix mélodieuse, nous trouverions imprimées sur ces molécules les conditions de mouvements desquelles dépend le charme de la voix. De même, dans la conversation ordinaire, le phénomène physique précède et fait naître le phénomène physiologique. Le langage parlé qui nous causera du plaisir ou de la peine, qui excitera en nous la colère ou nous inspirera des sentiments de paix, alors qu'il est encore entre nous et l'orateur, est une condition purement mécanique de l'air qui nous sépare.

J'agite cette boîte à outils, et vous entendez le choc des clous, des marteaux, des limes, des cisailles qu'elle contient, vous percevez ce qu'on appelle du bruit. Si je fais glisser un archet de violon sur ce diapason, vous entendez ce que nous nommons un son musical. Le bruit produit en nous l'effet d'une succession irrégulière de chocs. Nous avons la conscience quand nous entendons un bruit de secousses et de chocs imprimés au nerf acoustique ; les impressions de notre nerf auditif ne sont qu'une suite de heurts et de cahots, tandis que le son musical coule doucement sans aspérités et sans irrégularités aucunes. Comment cette douceur est-elle accusée ? *Par le retour parfaitement périodique des impulsions de la membrane du tympan.* Un mouvement périodique est celui qui se répète régulièrement. Le mouvement du pendule ordinaire, par exemple, est périodique, et ses oscillations dans l'air déterminent des ondes ou des pulsations qui se suivent avec une régularité parfaite. Mais de telles ondes sont beaucoup trop lentes pour exciter le nerf auditif. Pour produire un son musical, il faut un corps qui vibre avec la régularité absolue du pendule, et qui puisse imprimer à l'air des chocs beaucoup plus secs et plus rapides.

Concevons une première série d'impulsions se succédant à des intervalles de temps égaux et venant frapper la membrane du tympan; elle est ébranlée par le choc, et un corps ébranlé ne revient pas instantanément au repos. Mais l'oreille humaine est tellement construite que le mouvement sonore s'éteint avec une extrême rapidité, sans cependant que son extinction soit absolument instantanée; et si le mouvement imprimé au nerf auditif par chaque pulsation individuelle de la série, se continue jusqu'à l'arrivée de la pulsation suivante, le son ne cessera pas du tout. L'effet de chacun des chocs successifs se renouvellera avant d'être éteint, et les impulsions périodiques s'uniront ensemble pour former un son musical continu. Les pulsations, au contraire, qui produisent le bruit sont irrégulières dans leur force et leur retour. Elles heurtent l'oreille d'une manière confuse, et leur confusion se traduit en nous par une sensation désagréable. La musique ressemble à la poésie, si agréable par son rhythme et sa douceur ; le bruit produit l'effet d'une prose heurtée et sourde. Mais, de même que les mots de la prose peuvent, par un arrangement convenable, devenir de la poésie, de même, si nous parvenions à rendre ses éléments périodiques, le bruit tumultueux de la rue se convertirait en musique d'orchestre. L'effet du bruit sur l'oreille a été justement comparé à celui que produit sur les yeux une lumière vacillante : ces deux sensations sont également pénibles par les changements brusques et continuels des frémissements imposés à leurs nerfs respectifs.

La seule condition nécessaire à la production d'un son musical est donc que les pulsations, quelle que soit leur origine, se succèdent l'une à l'autre après le même intervalle de temps. Si cette condition est remplie, le son devient un son musical. Si, par exemple, les tic-tacs d'une montre se succédaient plus rapidement, s'il y en avait une centaine par seconde, ils perdraient leur individualité et se fondraient en une note musicale. Si les battements des ailes des pigeons avaient cette même rapidité, leur progression dans l'air serait accompagnée d'une musique. Cette rapidité est réellement atteinte par l'oiseau-mouche ; et, si des oiseaux nous passons aux insectes, dont les battements sont encore plus rapides, nous trouvons qu'une note musicale est l'accompagnement ordinaire de leur vol [1]. Les souffles d'une locomotive se succèdent lentement au départ, mais ils ne tardent pas à se succéder si rapides qu'on ne peut plus les compter. Si cette vitesse devenait encore plus grande, si le nombre des souffles s'élevait à 50 ou 60 par seconde, l'approche d'une locomotive serait annoncée par un son d'orgue d'une force effrayante.

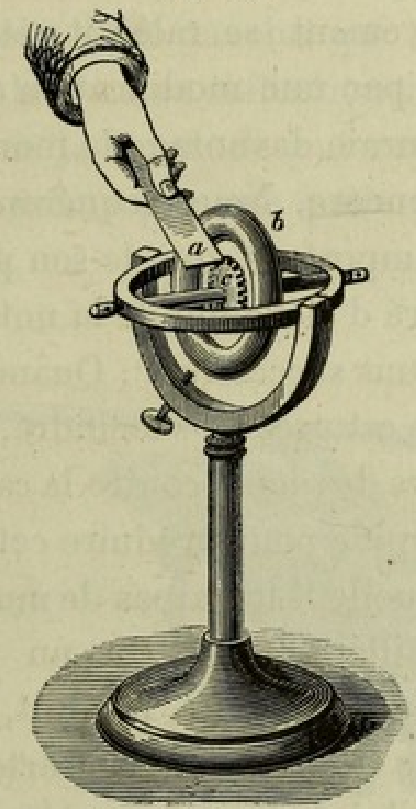
Galilée réussit à produire un son musical en passant vivement le dos d'un couteau sur le rebord d'une piastre. La petite dentelure qu'il découvrit sur le contour de la pièce de monnaie lui révéla le caractère périodique du mouvement, qui consistait dans une suite de chocs assez rapide pour produire une impression sonore continue. Il n'est pas d'écolier qui ne sache produire une note avec le crayon de son ardoise. Le tenant verticalement, sans trop le presser entre les doigts, et le faisant avancer sur l'ardoise, il fait naître une suite de petits chocs qu'on entend distinctement : en augmentant la pression, il fait que les chocs se succèdent assez rapidement pour produire un son continu. Je n'appellerai pas ce son un son musical, parce que l'expression, son musical, s'associe ordinairement à une idée de plaisir, et que le son du crayon n'est nullement agréable; mais il n'est réellement désagréable que parce qu'il n'est pas pur. Il est formé d'un assemblage de notes dont chacune pourrait plaire, mais dont plusieurs sont en plein désaccord.

On réalise ordinairement la production du son musical par la succession de petits chocs, en présentant le bord d'une

[1] Suivant Burmeister, leur bourdonnement est produit par l'entrée et la sortie de l'air respiré dans la cavité de la poitrine.

carte aux dents d'une roue qui tourne avec une certaine vitesse. L'expérience fut faite pour la première fois par Robert Hooke, que j'ai déjà cité[1]; et, à une époque plus rapprochée de nous, elle a été répétée par Savart, l'éminent physicien français. Nous nous bornerons au mode de démonstration le plus usité parmi nous. Voici (fig. 10) un gyroscope, instru-

Fig. 10.



ment formé principalement d'un anneau massif de cuivre b, dont le poids sert de surcharge à la circonférence

[1] En juillet 1681, « M. Hooke démontra la production des sons musicaux et autres par des expériences sur des roues dentées ; quand les dents étaient également espacées, les sons étaient musicaux ; quand les intervalles des dents étaient inégaux, les sons étaient analogues à ceux de la voix. » (Birth's *History of the Royal Society*, p. 96, publ. en 1757.)

Le passage suivant est extrait de la vie de Hooke, mise en tête de ses œuvres posthumes publiées par Richard Waller, secrétaire de la Société Royale. « En juillet de la même année, il (le docteur Hooke) indiqua le moyen de produire des sons musicaux et autres par le choc des dents de plusieurs roues en laiton, dont les nombres de dents étaient entre eux dans certains rapports, et que l'on faisait tourner avec beaucoup de rapidité. On constatait que des nombres égaux ou des rapports simples, par exemple de 2 à 1 ou de 4 à 3, produisaient des notes musicales, tandis que des nombres de chocs inégaux ou dont les rapports n'étaient plus simples rendaient des sons analogues à ceux de la voix parlée.

d'un disque que traverse à son centre un axe délicatement suspendu à ses extrémités. On enroule autour de cet axe un cordon, et, le tirant vigoureusement, on imprime à l'anneau un mouvement de rotation très-rapide qu'il communique à la petite roue dentée *c*. J'effleure ses dents avec le tranchant d'une carte, et vous entendez un son musical excessivement aigu. J'appuie pour un instant mon pouce contre l'anneau, le mouvement se ralentit, et ce ralentissement s'annonce aussitôt par une modification du son, qui devient moins aigu. Si j'enraie davantage le mouvement, le son devient plus grave encore. Nous acquérons ainsi la première notion de ce fait important, que le son plus ou moins aigu, c'est-à-dire le degré d'élévation de la note, dépend de la rapidité des impulsions successives[1]. Quand le mouvement de rotation de la roue est près de s'éteindre, vous entendez distinctement les chocs des dents contre la carte; leur succession n'est plus assez rapide pour produire cette continuité d'impressions sans laquelle il n'y a pas de musique.

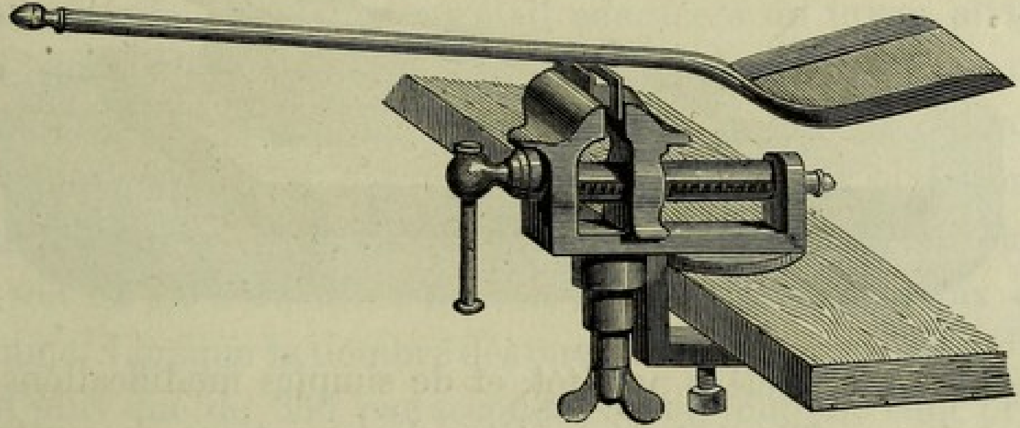
Une vis à tête saillante, fixée sur un plateau qui tourne avec une assez grande rapidité, produit, par les seuls chocs de sa tête contre le tranchant d'une carte, un son aussi net et aussi pur que celui de la roue dentée du gyroscope.

La génération des sons musicaux par des chocs répétés peut encore être rendue manifeste par l'expérience suivante : dans cet étau sont engagées deux lames de plomb parallèles, séparées par un intervalle d'environ 6 millimètres. Je place en équilibre sur leurs bords cette barre de cuivre, dans une direction transversale, et, par une légère pression sur une de ses extrémités, je la fais osciller comme une balançoire. Si ensuite je l'abandonne à elle-même, elle se remet au repos. Mais, si nous supposons que la barre, au

[1] Galilée, remarquant que les dentelures de sa lame métallique étaient plus serrées et plus nombreuses lorsque le son était plus aigu, tira de ce fait la même conclusion.

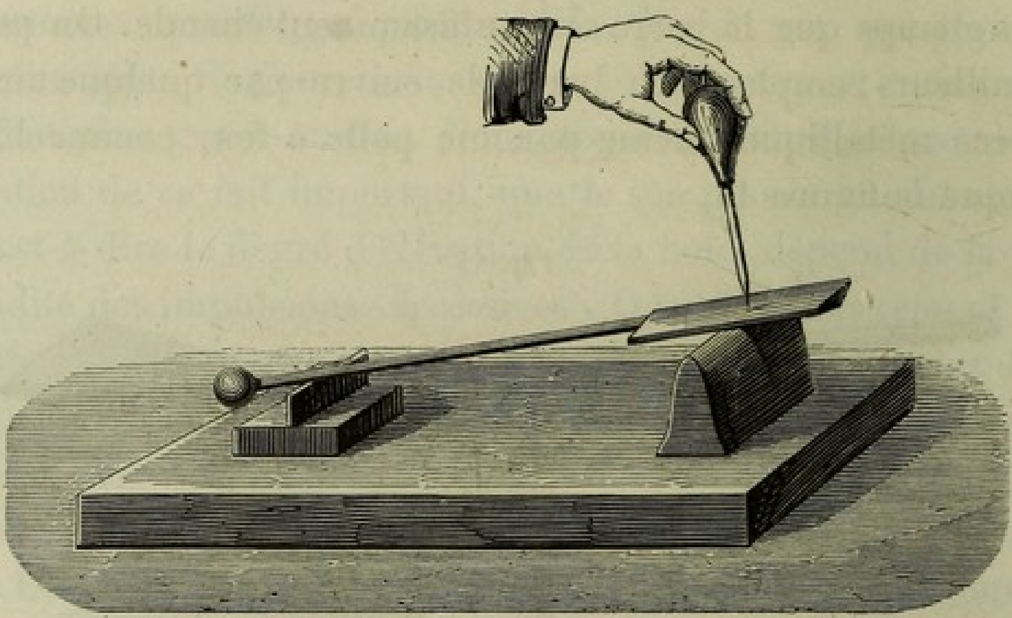
contact du plomb, soit sans cesse soulevée par une force émanant du plomb lui-même, ses oscillations pourront alors se continuer indéfiniment. Or, cette force de soulèvement se réalise quand la barre a été préalablement chauffée : à chaque contact du plomb, elle lui communique une partie de sa chaleur, et le plomb, en se dilatant, détermine un soulèvement soudain de la barre; il en résulte un balancement à droite et à gauche qui se continuera aussi longtemps que la barre sera suffisamment chaude. On peut d'ailleurs remplacer la barre de cuivre par quelque autre pièce métallique, même par une pelle à feu, comme l'indique la figure 11.

Fig. 11.



Dans ses oscillations, la barre frappe le plomb par petits coups, qui se succèdent assez lentement pour qu'on puisse les compter. Mais voici une pièce métallique de forme différente, qui vibrera avec plus d'énergie et fera que les coups se succéderont l'un à l'autre avec une rapidité plus grande. On pose le *berceau* (*fig.* 12) sur un bloc de plomb, et les chocs précipités font naître un bruit sourd que chacun peut entendre. Avec la pointe d'une tige, pressons le berceau contre le plomb, et la série des chocs, devenue plus rapide encore, engendre un son musical grave. Voici un autre berceau qui oscille beaucoup plus rapidement que le premier et qui produit un son musical, sans autre pression que celle due à son propre poids. Si cependant je le presse en appuyant avec la tige, j'accélère ses vibrations, le son s'élève, et voici qu'il rend une note d'une force et d'une pureté remarquables, qui remplit la salle entière. Dès que je fais cesser la pression, le son tombe immédiatement. Si je presse de

Fig. 12.



nouveau, il s'élève aussitôt, et de simples modifications de pression suffisent à faire naître des variations de son très-amusantes. Je remplace enfin ce second berceau par un troisième dont les vibrations sont encore plus rapides, et nous produisons des notes plus aiguës. Le son, cette fois, est obtenu moins aisément qu'avec le berceau précédent, et il varie plus capricieusement : tantôt c'est un son excessivement perçant qui, par intervalles, fait place à un son plaintif dont la note change d'un instant à l'autre. Au lieu du son mélodieux et plein du second berceau, nous avons un son aigre et suppliant, qui rappelle les cris d'un enfant maussade. Il n'est pas absolument nécessaire de recourir à des berceaux : prenons une pelle à feu dont le manche soit à faces polygonales planes, de formes différentes et très-bien décapées; chauffons-la et faisons-la porter sur le bloc de plomb par une de ses faces, nous entendons un bruit; appliquons-la par une autre face, le bruit fait place à une belle note musicale : car, par cela même que les deux faces ont reçu de la lime des formes différentes, les vibrations se succèdent à des intervalles inégaux [1].

M. le docteur Robison produisit le premier un son musical par la succession rapide des pulsations de l'air. Il imagina la première forme d'un instrument avec lequel nous nous familiariserons bientôt sous le nom de sirène. Voici comment il décrit son expérience : « Je fis construire une soupape qui pût ouvrir ou fermer un tuyau 720 fois dans une seconde. Cette soupape était adaptée à un tuyau allant du soufflet au réservoir d'air ou sommier d'un orgue; on faisait écouler doucement l'air dans le tuyau en ouvrant la soupape, et, quand la soupape s'ouvrait et se fermait 720 fois par seconde, il se produisait un son agréable : c'était le son de *sol* à l'octave; il avait la douceur d'une voix de femme. Lorsque le nombre des ouvertures et fermetures n'était plus que de 360 par seconde, le son toujours clair prenait quelque chose de la sévérité d'une voix d'homme.

[1] Lorsqu'une marée houleuse roule sur un fond caillouteux, comme à *Blackgand* en Chine, ou à *Freshwater Gate* dans l'île de Wight, les cailloux arrondis sont emportés sur la pente par l'impétuosité de l'eau, et, lorsque la vague se retire, ils sont ramenés à la mer. Il en résulte une série de collisions innombrables, d'intensité et de période irrégulières. L'union de ces chocs fait sur l'oreille l'effet d'une sorte de cri, auquel Tennyson fait allusion dans son *Maud*.

Voici le cri d'une plage rendue folle et draguée par la vague :

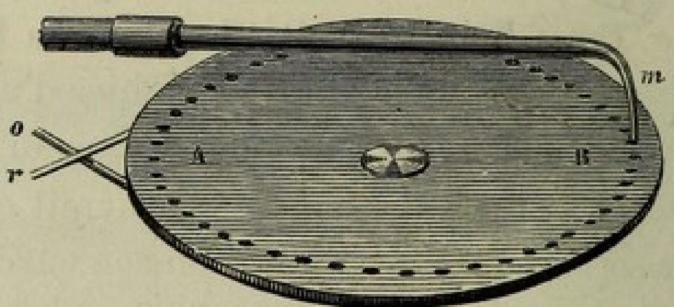
« *Now to the scream of a maddened beach dragged down by the wave.* »

L'élévation de la note dépend en quelque mesure des dimensions des cailloux, et varie d'une sorte de mugissement, lorsque les cailloux sont très-gros, à un cri; du cri au bruit du lard frit dans la poêle, et de ce bruit enfin, lorsque les cailloux très-petits ne sont guère plus que des graviers, à un simple sifflement. Le bruit produit par les brisements de la vague est dû principalement à l'explosion des grosses bulles d'air comprimé qu'elle contient.

Dans une autre expérience, la soupape fut modifiée de manière à ne jamais fermer entièrement l'ouverture, à la laisser ouverte sur le tiers au moins de sa surface. Or, quand la soupape s'ouvrait et se fermait ainsi 720 fois par seconde, le son rendu avait une douceur ravissante; quand elle n'ouvrait et ne fermait que 360 fois, on retrouvait la voix d'homme, mais avec un moelleux extraordinaire. » (Robison.)

La difficulté d'obtenir une vitesse suffisante avec le mécanisme que nous venons de décrire, a fait imaginer un autre mode d'expérimentation mieux combiné. Voici (*fig.* 13) un

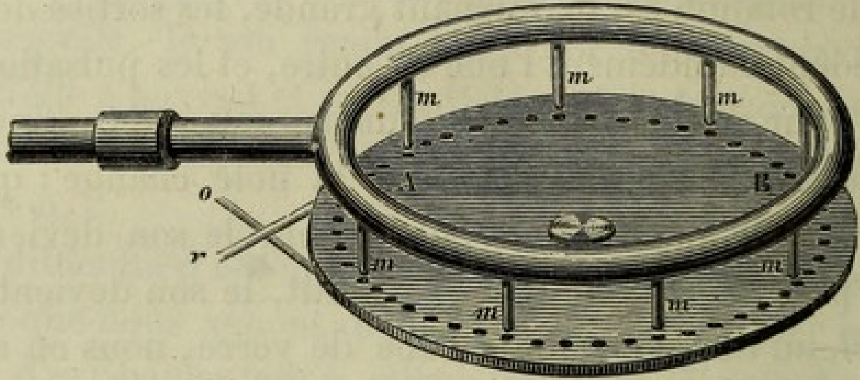
Fig. 13.



disque B de carton percé de trous uniformément distribués près des bords de sa circonférence. Renforcé par une plaque de ferblanc et fixé à la surface d'un plateau animé d'un mouvement rapide de rotation, il peut faire un grand nombre de tours sur lui-même. Lorsqu'il tourne ainsi, les trous disparaissent individuellement et s'unissent pour donner la sensation d'un cercle continu. Au-dessus et tout près du disque, nous remarquons un tube de verre *m* communiquant avec une soufflerie acoustique. Le disque est maintenant au repos, et l'extrémité inférieure du tube de verre est immédiatement au-dessus de l'un des trous du disque. Si la soufflerie soufflait, le vent passerait par le trou du disque ouvert au-dessous de lui ; mais, si le disque tourne d'une très-petite quantité, une portion imperforée du disque viendra se placer au-dessous de l'ouverture, et le courant d'air sera intercepté. Cela posé, en faisant tourner le disque lentement, j'amène les trous successifs au-dessous de l'orifice du tube, et chaque fois qu'un trou se présente il y a une sortie ou souffle d'air. La vitesse de rotation est maintenant grande, les sorties de l'air se succèdent rapidement l'une à l'autre, et les pulsations se fondent pour donner naissance à un son musical continu, entendu de tous. Remarquez comme la note change : quand on accélère le mouvement de rotation, le son devient de plus en plus aigu; quand on le ralentit, le son devient plus grave. Si, au lieu d'un simple tube de verre, nous en adaptons deux, tels que la distance entre leurs orifices soit égale à la distance de deux trous contigus ouverts au-dessous d'eux, il est évident que, quand on soufflera à la fois par les deux tubes, il y aura deux pulsations ou sorties d'air par les deux trous consécutifs. L'intensité du son sera par là même augmentée, mais la note restera la même; les deux sorties ou pulsations d'air agiront de concert et produiront sur l'oreille une impression plus forte. Si, au lieu de deux trous, nous en avons dix, ou mieux si nous avons un tube circulaire ouvert au-dessus de chacun des orifices, l'air sortira à la fois par tous les trous du disque; tous ces trous seront à la fois ouverts ou fermés; l'ensemble des pulsations rendra un son d'intensité beaucoup plus grand que lorsque les sorties alternées avaient lieu par un seul tube. Dans la disposition représentée figure 14, il y a neuf orifices de sortie et neuf tubes par lesquels l'air sort pour pénétrer dans les neuf ouvertures. Il y a à la fois neuf pulsations. En accélérant ou ralentissant le mouvement de rotation, on entend le son s'élever ou s'abaisser semblable aux gémissements d'un vent d'intensité variable.

On a eu encore recours à d'autres moyens pour imprimer à l'air un mouvement périodique. Ainsi, une corde tendue, qu'on écarte de sa position d'équilibre et qu'on abandonne ensuite à elle-même, imprime à l'air des vibrations qui se

Fig. 14.



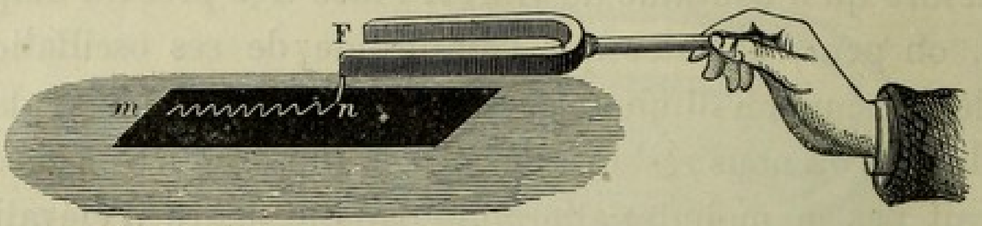
succèdent à des intervalles de temps d'une régularité parfaite. On obtient le même résultat avec un diapason. On fait glisser perpendiculairement aux branches du diapason un archet dont les crins, frottés avec de la colophane, ont acquis la propriété de gripper sur le métal. Les branches cèdent d'abord aux tractions exercées par les aspérités des crins et s'écartent de leur position d'équilibre; mais bientôt leur résistance devient telle qu'elle l'emporte sur l'effort de l'archet, et elles reviennent subitement à leur première position. L'archet continuant son action, il se produit un nouvel écart des branches, puis un nouveau retour à la position primitive, et ainsi de suite. Par la répétition de ces mouvements périodiques, les branches du diapason se constituent en état de vibrations intenses, et il en résulte une belle note musicale. Une personne placée tout près de l'instrument peut voir le diapason vibrer. Le sourd qui en approcherait assez la main sentirait le frémissement de l'air. J'amène maintenant la branche vibrante au contact d'une carte, et ses battements, communiqués à la carte, comme dans le cas du gyroscope, s'unissent pour former un son musical, en même temps que le diapason revient à l'état de repos. Il est maintenant tout à fait calme, et ce que nous appelons le silence exprime l'absence de mouvement.

Au moment où nous excitons le diapason, le son qu'il rend a son maximum d'intensité; il s'affaiblit graduellement à mesure qu'il continue de vibrer. Placé très-près du diapason, on peut constater que l'amplitude de ses oscillations ou leur excursion diminue aussi de plus en plus. Mais, dans les limites où nous restons, l'oreille la plus exercée ne découvrirait pas la moindre altération dans le degré d'élévation de la note. L'affaiblissement graduel de l'intensité du son n'entraîne donc pas son abaissement. De fait, quoique l'amplitude change, le nombre des vibrations reste le même; le ton et l'intensité doivent donc être nettement distingués; l'intensité dépend uniquement de l'amplitude des vibrations, le ton dépend de leur nombre ou de la rapidité avec laquelle elles s'exécutent.

On peut amener un diapason à écrire lui-même l'histoire de ses propres mouvements; la manière dont on y parvient est très-facile à comprendre. Prenant dans vos doigts un morceau de craie, essayez d'écrire sur un tableau noir une ligne verticale. Aussi longtemps que votre main ne déviera ni à droite ni à gauche, la ligne qu'elle tracera sera bien verticale. Mais si, pendant que votre main se meut ainsi de bas en haut, vous la faites mouvoir à droite et à gauche, vous tracerez sur le tableau une ligne sinueuse. Les dentelures ou sinuosités mettent en évidence les oscillations de votre main, leur profondeur mesure l'amplitude de ces oscillations latérales.

Revenons maintenant au diapason. A l'extrémité F (*fig.* 15) de l'une de ses branches, on fixe une petite lame prise dans une feuille mince de cuivre et taillée en pointe; on excite le diapason, il vibre, et la petite lame de cuivre la suit dans toutes ses vibrations ; on amène la pointe de la lame à toucher doucement la surface d'une lame de verre enfumé; en caressant, dans son mouvement de va-et-vient,

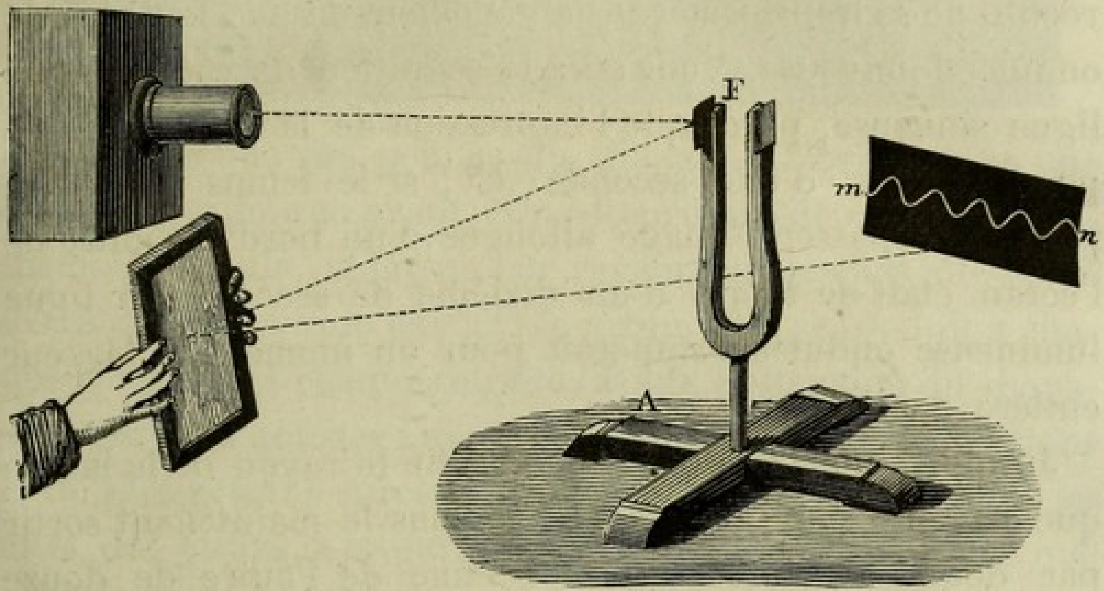
Fig. 15.



la surface recouverte de noir de fumée, elle y laisse la trace très-nette de ses excursions. Aussi longtemps que la main reste complétement immobile, la pointe va et vient suivant la même ligne, absolument comme la craie, il y a un moment, décrivait la même ligne sur le tableau noir. Mais il est évident qu'il suffit d'entraîner en ligne droite le diapason sur la plaque de verre ou la plaque de verre sous le diapason, pour produire une ligne sinueuse; je le fais et la ligne est tracée. Installons maintenant la plaque de verre enfumée sur le trajet d'un faisceau de lumière électrique, et recevons sur un écran son image agrandie; la ligne sinueuse brillante devient visible à tous les yeux. Si, pendant que la plaque est ainsi installée en avant de la lampe, on anime une seconde fois le diapason et que l'on promène de nouveau la pointe sur la plaque enfumée, on voit immédiatement surgir une nouvelle ligne sinueuse brillante. Si l'on répète l'expérience sans plus exciter le diapason, on constate que les dentelures de la ligne ondulée diminuent considérablement de profondeur. La ligne sinueuse s'approche de plus en plus de la ligne droite, et le décroissement des amplitudes est ainsi rendu visible. L'amplitude est réduite à zéro quand les sinuosités ont complétement disparu, et en même temps le son, dont l'intensité est proportionnelle à l'amplitude, a complétement cessé.

On doit à M. Lissajous un charmant moyen de donner une expression optique aux vibrations d'un diapason : à l'extrémité F (*fig.* 16) de l'une des branches de ce grand

Fig. 16.



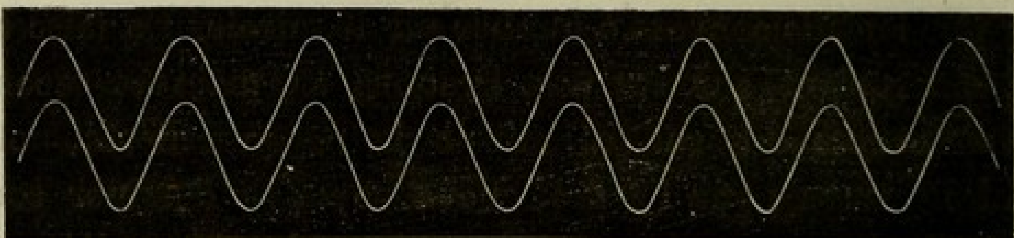
diapason, fixons un petit miroir métallique, et, pour rétablir l'équilibre, collons à l'autre branche avec de la cire une petite masse métallique. Dressons le diapason en face d'une lampe électrique, à une grande distance d'un écran noir, et amenons un faisceau de lumière intense rendu convergent par une lentille convexe à tomber sur le miroir. Ce faisceau réfléchi revient sur ses pas. Prenons en main un second miroir et recevons sur ce miroir le rayon réfléchi, pour qu'il le renvoie sur l'écran. Vous voyez se dessiner sous forme de disque lumineux, à la surface blanche de l'écran, l'image de l'ouverture qui donne issue au faisceau lumineux. Elle est parfaitement immobile, mais aussitôt que le diapason entre en vibration, le rayon lumineux réfléchi est animé d'un mouvement rapide de haut en bas, de bas en haut, donnant naissance à une ligne lumineuse ondulée d'un mètre de long. La longueur de la bande dépend de l'amplitude de la vibration, et vous voyez qu'elle se raccourcit à mesure que le mouvement du diapason s'éteint.

Cette bande reste rectiligne aussi longtemps que la glace tenue à la main demeure immobile ; mais dès que l'on fait tourner la glace de manière à forcer le faisceau de se déplacer de droite à gauche sur l'écran, on voit cette bande rectiligne se transformer instantanément en une belle bande ondulée lumineuse. Vous avez la sensation de cette longue ligne sinueuse, parce que l'impression de la rétine persiste pendant plus d'une seconde. Et, si le temps nécessaire pour faire passer l'image allongée d'un bord à l'autre de l'écran était de moins d'un dixième de seconde, la ligne lumineuse ondulée occuperait pour un moment la largeur entière de l'écran.

Jusqu'ici nous n'avons laissé sortir le rayon de la lampe que par une seule ouverture ; laissons-le maintenant sortir par deux ouvertures distantes l'une de l'autre de douze millimètres, de manière à projeter sur l'écran deux disques lumineux situés l'un au-dessus de l'autre.

Dès que le diapason est excité et que l'on fait tourner le miroir, on voit (*fig.* 17) deux lignes brillantes ondulées courir

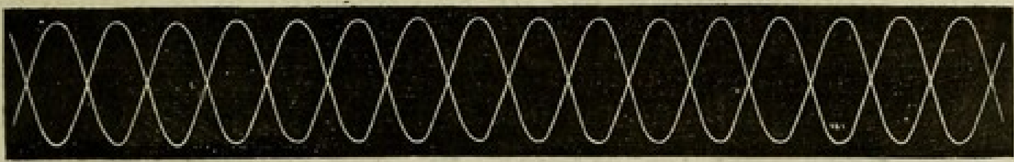
Fig. 17.



sur la surface noircie. Déplaçons les diaphragmes de manière à placer les deux disques lumineux à côté l'un de l'autre, puis excitons le diapason et faisons tourner le miroir ; nous obtenons ainsi (*fig.* 18) la belle figure produite par les entrelacements des deux lignes lumineuses ondulées. Le dessin toutefois est impuissant à donner une idée de l'aspect mouvementé des lignes réelles de lumière sur le tableau.

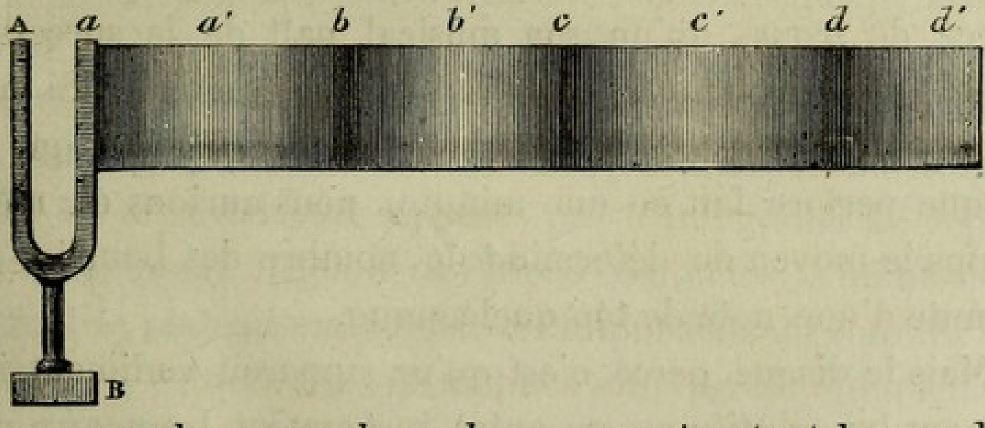
Comment nous représenterons-nous à nous-même l'état de l'air à travers lequel passe un son musical? Imaginons

Fig. 18.



d'abord qu'une des pointes du diapason vibrant fasse une excursion rapide en avant : elle comprime l'air en contact immédiat avec elle, et lorsqu'elle revient sur ses pas elle laisse derrière elle un vide partiel ; le même effet se produit à chaque avance et à chaque retraite. Toute la fonction du diapason consiste à amener l'air à cette condition de condensations et de raréfactions successives, qui se propagent à la suite les unes des autres, à mesure qu'elles sont formées. Ainsi que nous l'avons déjà dit, une condensation associée à la raréfaction qui la suit constitue une *onde sonore*. Dans l'eau, la longueur d'une onde se mesure de crête à crête ou de sommet à sommet, tandis que, dans le cas du son, la *longueur d'onde* est donnée par la distance de deux condensations successives. En réalité, la condensation d'une onde sonore correspond à la crête d'une vague, tandis que la raréfaction correspond à la dépression ou au creux de l'onde liquide. Si (*fig.* 19)

Fig. 19.



les espaces obscurs a, b, c, d, ... représentent les condensations, et les parties éclairées a', b', c', d', ... les raréfactions des ondes sonores émanant d'un diapason A B, la longueur d'onde sera l'intervalle de *a* à *b*, ou de *b* à *c*, ou de *c* à *d*, etc.

Nous avons vu que le *ton* du son dépend de la rapidité ou du nombre des vibrations. Lorsque deux notes émises par des corps sonores quelconques ont le même ton, leurs périodes de vibrations sont les mêmes. Si, par exemple, une corde vibrante rend la même note qu'un diapason, c'est que les deux corps vibrent avec la même vitesse; et de même quand un diapason donne la même note qu'un tuyau d'orgue ou une lame d'harmonica, c'est que l'acier du premier instrument exécute ses vibrations dans le même temps que la colonne d'air du tuyau d'orgue et le verre de l'harmonica exécutent les leurs. Il en est ainsi de la voix humaine. Si une corde et la voix d'un chanteur rendent une même note, c'est que les cordes vocales du larynx du chanteur vibrent dans le même temps que la corde. Existe-t-il quelque moyen de déterminer le nombre vrai des vibrations correspondantes à une note musicale? Pouvons-nous déduire du ton de la note rendue par une corde de violon, un tuyau d'orgue, un diapason ou une voix humaine, le nombre des ondes qu'ils lancent en une seconde? Ce beau problème a pu recevoir sa solution la plus complète.

Nous avons vu, par la rotation d'un disque en carton percé de trous, qu'un son musical naît de la succession rapide des pulsations, souffles ou bouffées d'air. Si nous pouvions enregistrer le nombre des révolutions que le disque perforé fait en une minute, nous aurions en même temps le moyen de déterminer le nombre des bouffées par minute d'une note de ton quelconque.

Mais le disque percé n'est qu'un appareil rudimentaire, et nous lui substituons un autre instrument beaucoup plus parfait que nous allons décrire. Il n'a pas besoin d'être installé sur une table à rotation, et il enregistre lui-même ses révolutions avec une parfaite exactitude.

C'est la sirène de Cagniard de Latour, représentée figures 20, 21 et 22.

Fig. 20.

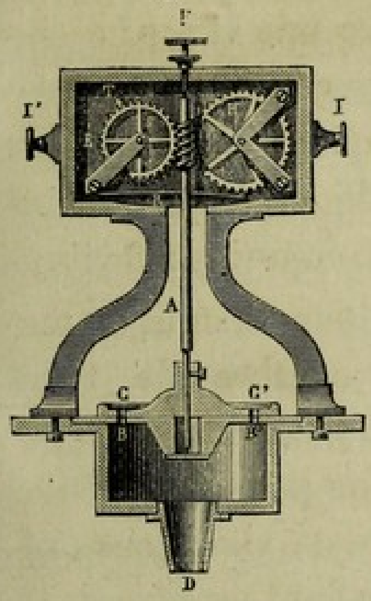


Fig. 21.

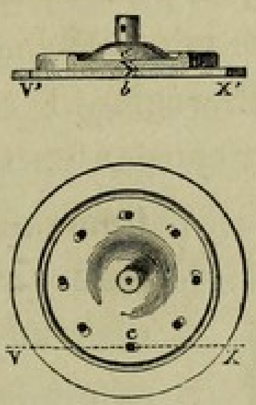
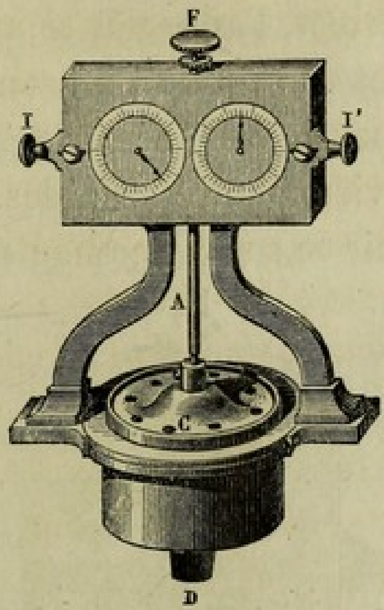
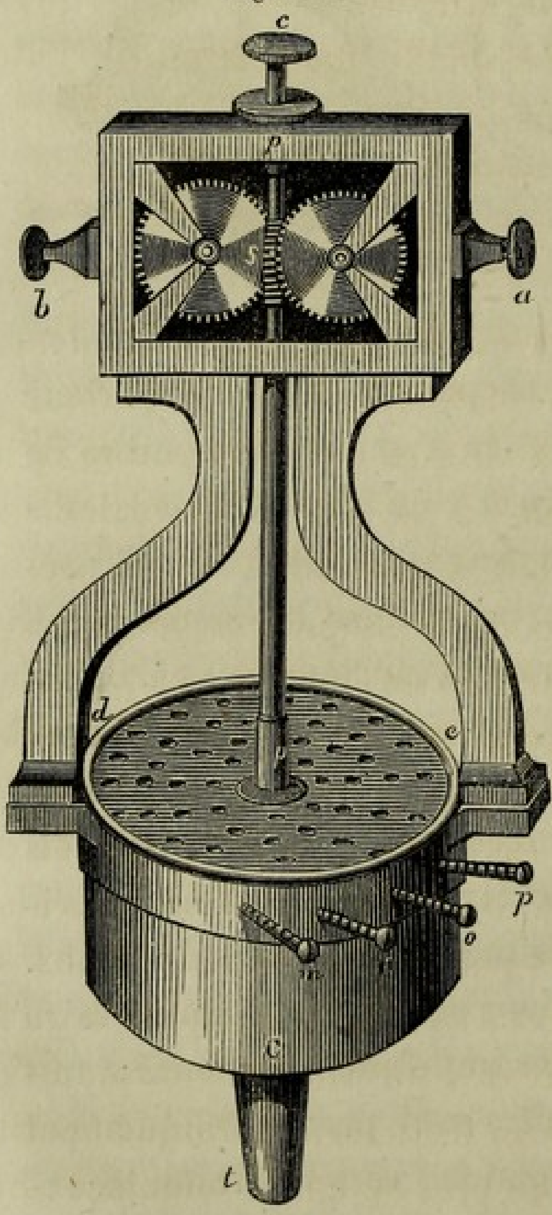


Fig. 22.



Un tambour cylindrique DBB', dans lequel on insuffle de l'air par un tuyau D, est terminé par un disque supérieur plan BB', percé sur sa circonférence d'un certain nombre de trous équidistants. Supposons qu'il y en ait 8. Un deuxième disque métallique CC', placé au-dessus et très-près du premier, tourne autour d'un axe vertical ; il est lui-même percé de 8 trous qui peuvent se placer en coïncidence ou en opposition avec ceux du disque fixe, et, par conséquent, laisser passer ou arrêter le courant d'air. Le plateau supérieur tourne rapidement ; il ouvre et ferme alternativement 8 fois les conduits pendant un tour, et il y a 8 impulsions imprimées à l'air extérieur, séparées par 8 intervalles de repos. Par conséquent, il y a 8 vibrations complètes. Afin de faire tourner le plateau mobile par les impulsions du courant lui-même, les orifices fixes et mobiles sont percés obliquement (*fig*. 21), les premiers *b* de la gauche vers la droite, les seconds *c* de la droite vers la gauche. De cette façon, le courant, obligé de changer de direction brusquement, imprime de V′ à X′ une impulsion tangentielle au plateau supérieur qui prend une vitesse d'autant plus grande que la pression de l'air est plus forte dans le tambour. Si l'on fait communiquer le tube D avec une soufflerie par l'intermédiaire d'un robinet, l'appareil se met à tourner avec une vitesse croissante, et produit un son qui, d'abord très-grave, s'élève peu à peu jusqu'à cesser d'être perceptible, quand les vibrations deviennent trop rapides. En réglant le robinet, on peut maintenir ce son à une hauteur constante, et comme il y a 8 vibrations par tour, il suffit de mesurer le nombre de tours effectués pendant une seconde pour pouvoir calculer le nombre de vibrations exécutées pendant ce temps. A cet effet, l'axe AF porte à sa partie supérieure une vis sans fin; cette vis engrène avec une roue dentée E (*fig.* 20), qu'elle fait marcher d'une dent par tour, et dont les mouvements sont accusés par une aiguille mobile sur un cadran extérieur (*fig.* 22). Soit 100 le nombre total des dents de la roue et des divisions du cadran; chaque division correspond à 8, et chaque tour du cadran à 800 vibrations. Après que la roue E a fait un tour complet, un bras T vient rencontrer une deuxième roue dentée

Fig. 23.



H, et fait marcher d'une division l'aiguille qui lui correspond. Par conséquent, si, pendant la durée de l'expérience, la deuxième aiguille a marché de n et la première de n' divisions, le nombre des vibrations sera égal à $n \times 100 + n' \times 8$.

La sirène de Cagniard de Latour a reçu de M. Dove, de Berlin, des perfectionnements importants. Au bas un tuyau t introduit l'air dans un cylindre en laiton C, fermé à son sommet par une plaque de laiton invisible dans la figure. Cette plaque est percée de quatre séries de trous disposés suivant des cercles concentriques. La série intérieure contient 8 trous, la seconde 10, la troisième 12, et la quatrième extérieure 16. Quand on souffle dans le tube t, l'air s'échappe à travers les orifices, et le problème à résoudre est de convertir les courants continus en pulsations discontinues. On y arrive par le moyen d'un disque en laiton $d\,e$, percé aussi de quatre séries de 8, de 10, de 12 et de 16 trous aux mêmes distances du centre, et séparés par les mêmes intervalles que les trous de la plaque qui ferme le cylindre C. A travers le centre du disque $c\ d$ passe un axe en acier, dont les deux extrémités p et p' sont amincies en pointe et bien polies. Le but à atteindre est de faire tourner le disque $c\,e$ au-dessus de la plaque percée de trous qui ferme le cylindre C. Pour cela on a ménagé au centre de la plaque une cavité percée dans de l'acier finement poli, et destinée à recevoir l'extrémité inférieure p de l'axe; on place dans cette cavité l'extrémité p'' de l'axe vertical, et l'on installe sur son extrémité supérieure p une calotte en acier c, aussi très-polie à l'intérieur. L'axe est ainsi maintenu à son sommet et à sa base, et la pression qu'il supporte est si légère, le poli des surfaces en contact est si doux, qu'il peut tourner avec un frottement infiniment petit. En faisant tourner le disque $d\,e$ plus ou moins lentement, on peut faire que ses trous coïncident ou ne coïncident pas avec ceux du cylindre placé au-dessous. A mesure que le disque tourne, ses orifices passent alternativement sur les trous du cylindre et sur les espaces pleins entre les trous. Il est évident par là que si l'on vient à insuffler de l'air dans le cylindre C, et si en même temps on fait tourner le disque, on atteindra le but, c'est-à-dire qu'on divisera le courant d'air en pulsations. Dans la sirène de Dove comme dans celle de Cagniard de Latour, le disque tourne sous la seule impulsion de l'air, qu'il a pour mission de rendre intermittent. Voilà comment, dans son passage à travers la sirène, l'air est moulé en ondes sonores. Le mécanisme enregistrant est aussi le même dans les deux sirènes, mais le cylindre C, de la sirène de Dove, porte sur un des cercles horizontaux de la surface quatre séries de tiges ou clefs, *m*, *n*, *o*, *p*, à l'aide desquelles chacune des quatre séries de trous percés dans la plaque qui ferme le cylindre peut être tour à tour ouverte ou fermée à volonté. En pressant sur *m*, on ouvre une série; en pressant sur *n*, on en ouvre une autre; en pressant à la fois deux clefs, on ouvre deux séries de trous; en pressant trois clefs, on en ouvrirait trois; en pressant enfin sur les quatre clefs, on ferait sortir simultanément les pulsations par les quatre séries de trous.

Faisons maintenant entendre notre sirène. En poussant la première clef, nous ouvrons la série de trous extérieurs du disque inférieur, et en faisant jouer le soufflet, nous lançons l'air contre les parois des trous obliques du disque supérieur, qui commence à tourner. Nous entendons une succession de souffles qui se suivent assez lentement pour qu'on puisse les compter. Mais à mesure que la vitesse de rotation devient plus grande, les souffles se succèdent plus précipités, et voici que nous entendons un son musical très-grave. La vitesse de rotation a encore augmenté, et le ton du son monte. Il est en ce moment fort et plein. Si nous injectons l'air avec plus de vigueur encore, il deviendra assez perçant pour blesser nos oreilles. C'est une nouvelle manifestation de la dépendance entre le ton du son et la rapidité des vibrations. En appuyant le doigt contre le bord du disque, nous diminuons sa vitesse, le ton du son s'abaisse immédiatement. Appuyons plus encore, le son deviendra de plus en plus grave, et nous reviendrons aux souffles discontinus du commencement de l'expérience. Si le courant d'air lancé dans l'appareil avait une force suffisante, si tous les organes de la sirène étaient complétement soustraits au frottement, nous obtiendrions des notes de plus en plus élevées, et le son deviendrait assez aigu pour ne pouvoir plus être entendu de l'oreille humaine. La cessation de la sensation ne prouverait cependant pas l'absence de tout mouvement vibratoire dans l'air ; elle nous apprendrait seulement que notre appareil auditif n'est pas apte à saisir, ou que notre cerveau est impuissant à transformer en son les vibrations dont la rapidité dépasse une certaine limite. Sous ce rapport, comme nous le verrons bientôt, l'œil est pour la lumière dans le même cas que l'oreille pour le son.

Au moyen de la sirène, nous pouvons déterminer avec une extrême précision les nombres de vibrations de tout corps sonore, que ce soit une corde, un tuyau d'orgue, une anche, ou une voix humaine. Nous pourrions même, en opérant assez délicatement, parvenir à conclure du bourdonnement d'un insecte combien de fois il frappe l'air de ses ailes dans une seconde. Comme application, déterminons ensemble les nombres de vibrations de ce diapason. Poussé par le jeu de ce soufflet acoustique, l'air traverse la sirène, elle commence à rendre un son, et en frottant le diapason avec l'archet nous le faisons résonner à son tour. Tous les deux rendent un son, et jusqu'à présent la note du diapason est la plus élevée. Mais voici que la note de la sirène monte, et nous entendons les *battements* si bien connus des musiciens, comme indiquant que les deux notes sont près de l'unisson. Remarquez que les battements deviennent de plus en plus lents : ils ont entièrement disparu, et les deux notes se fondent l'une dans l'autre comme s'il n'y avait plus qu'une seule série de sons. L'unisson est maintenant parfait, essayons de le maintenir en modérant convenablement le jeu du soufflet. Jusqu'ici le rouage ou mécanisme enregistreur de la sirène est resté immobile ; faisons-le partir en poussant le bouton de départ à l'instant où l'aiguille des secondes de la montre passera sur la division 60. Laissons le disque continuer sa rotation pendant une minute, en prenant soin seulement de ranimer de temps à autre les vibrations du diapason, pour nous assurer que l'unisson se maintient. Voici que l'aiguille des secondes de la montre approche de nouveau de 60 : au moment où elle y arrive, pressons le bouton d'arrêt et suspendons le mouvement des rouages. Nous trouverons enregistré sur les cadrans le nombre exact des révolutions du disque ; ce nombre est 1 440. Mais la série de trous ouverte pendant l'expérience était de 16 : nous avions donc dans chaque révolution 16 bouffées d'air ou 16 ondes par seconde. En multipliant 1 440 par 16, nous obtenons 23 040 pour le nombre des vibrations exécutées par le diapason en une minute ; ce nombre, divisé par 60, nous donne 384, nombre des vibrations du diapason en une seconde. Quand la vitesse de vibration a été déterminée, on calcule sans peine la longueur correspondante de l'onde sonore. Concevons que le diapason vibre à l'air libre. Au bout d'une seconde, à partir du commencement de la vibration, la première onde qui s'est formée aura parcouru 332 mètres, en supposant que la température fût celle de la congélation de l'eau. Dans un air à la température de 15°, qui est celle de cette salle, le son parcourt 341 mètres par seconde. Divisant donc 341 par 384, nous trouvons à peu près 88 centimètres pour la longueur de l'onde. L'expérience, appliquée aux quatre diapasons qui sont devant nous, donne pour leurs nombres de vibrations par seconde 256, 320, 384 et 512, auxquels correspondent les longueurs d'onde $1^{m},32$, $1^{m}66$, $0^{m},88$ et $0^{m},66$. Les longueurs d'onde correspondant à des voix d'homme, dans la conversation ordinaire, varient de $2^{m},4$ à $3^{m},6$; celle d'une voix de femme, de $0^{m},6$ à $1^{m},2$. Le ton de la voix de femme pour les sons bas de la conversation est donc à plus d'un octave au-dessus de la voix d'homme; dans les tons élevés, la différence est de près de deux octaves.

Notons bien d'ailleurs qu'en parlant de vibrations, nous entendons des *vibrations complètes* ou *ondulations*, et que sous l'expression d'ondes sonores nous comprenons l'ensemble d'une condensation et d'une dilatation. Une vibration embrasse l'excursion va-et-vient, en avant et en arrière, du corps en vibration. Chaque onde engendrée par de semblables vibrations tend la membrane du tympan une fois de dehors en dedans, une fois de dedans en dehors. Ce sont là, en Angleterre et en Allemagne du moins, les définitions de la vibration et de l'onde sonore. Mais, en France, une vibration est l'excursion dans un seul sens du corps vibrant, aller ou retour; les vibrations françaises ne sont donc que des moitiés de vibrations anglaises ou allemandes ou de *demi-oscillations*, et nous les appellerons des demi-vibrations. Toutes les fois que dans ces leçons le mot *vibration* sera employé sans qualification spéciale, il se rapportera à une vibration complète ou oscillation.

Pendant le temps que chaque onde sonore met à passer par une particule d'air, cette particule accomplit une vibration complète. Elle est d'abord poussée en avant et amenée à l'état de condensation ; elle est ensuite ramenée en arrière par la raréfaction. Le temps employé par la particule à exécuter une oscillation complète est donc le temps exigé par l'onde sonore pour parcourir une distance égale à sa longueur d'onde.

Supposons que cette longueur d'onde soit de 2m,4, et la vitesse du son, à la température ambiante, de 341 mètres par seconde, l'onde en question parcourra sa longueur dans l'air en un 140ième de seconde, et ce sera le temps employé par chaque particule d'air sur laquelle l'onde passe pour faire son oscillation complète. Dans un air de densité et d'élasticité constantes et uniformes, une même longueur d'onde correspond toujours à un même ton. Mais si la densité et l'élasticité ne sont pas uniformes, si nous supposons, par exemple, que l'onde sonore de l'un de nos diapasons passe d'un air froid à un air chaud, il en résultera une augmentation de la longueur d'onde sans changement de ton, parce que la rapidité avec laquelle les ondes se succèderont et arriveront à notre oreille ne changera pas. Réciproquement, la longueur d'onde restant la même, le ton sera plus élevé dans l'air chaud que dans l'air froid, parce que la succession des ondes sera plus rapide. Dans une atmosphère d'hydrogène, des ondes de 2m,4 produiront un son plus élevé, à peu près, de deux octaves que le son produit dans l'air; car par suite de sa rapidité plus grande, le nombre des pulsations reçues dans un temps donné sera dans le premier cas quatre fois plus grand à peu près que dans le second.

Ouvrons maintenant à la fois la série la plus intérieure et la série la plus extérieure des trous de notre sirène. En même temps que les sons rendus simultanément ou successivement, une oreille musicale perçoit le rapport des deux sons; elle constate que le son issu de la série de 16 est à l'octave du son qui sort de la série de 8 orifices. Et cela doit être, car pour chaque onde lancée par la seconde série, il y a deux ondes lancées par la première. Nous mettons en évidence, de cette manière, la signification physique du mot *octave :* il désigne une note produite par un nombre de vibrations double de celui du ton fondamental. En multipliant par 2 le nombre des vibrations de l'octave, nous obtiendrons son octave ou la double octave, et en continuant cette multiplication par 2, nous réaliserons une série de nombres correspondants à une série d'octaves. Partant, par exemple, de la note fondamentale de 100 vibrations par seconde ; nous trouverons, en doublant cinq fois successivement, qu'une note plus élevée de cinq octaves correspond à 3 200 vibrationspar seconde.

100	Note fondamentale.
2	
200	1re octave.
2	
400	2e octave.
2	
800	3e octave.
2	
1600	4e octave.
2	
3200	5e octave.

On obtiendrait plus directement ce dernier nombre en multipliant 100 par la cinquième puissance de 2, qui est 32. Dans une autre conférence, nous reviendrons sur cette question des intervalles musicaux. Il nous suffit, pour le moment, d'avoir défini l'octave d'un son.

Nous avons déjà vu que l'échelle des sons perceptibles à l'oreille humaine a sa limite. L'oreille, en effet, dans la perception des sons musicaux a deux limites, l'une inférieure, l'autre supérieure.

Savart a fixé à huit vibrations complètes par seconde le dernier son perceptible à l'oreille humaine, et pour amener ces huit vibrations par seconde à se fondre en un son distinct et continu, il était forcé de recourir à des chocs de grande puissance. Ses expériences avec les roues dentées l'amenèrent à donner pour limite supérieure un son de 24 000 vibrations par seconde. Les recherches récentes de Helmholtz l'ont conduit à adopter pour la limite inférieure 16 et pour la limite supérieure 38 000 vibrations. En employant de très-petits diapasons, M. Desprez arriva à constater qu'on entendait encore un son de 38 000 vibrations par seconde [1]. Partant de la note 16 et multipliant continuellement par 2, ou, ce qui est plus simple, élevant 2 à la onzième puissance, et multipliant par 16, nous trouvons qu'à 11 octaves au-dessus du son fondamental le nombre des vibrations est 32 728. En prenant, par conséquent, les limites assignées par Helmholtz, l'échelle entière de l'oreille humaine embrasserait près de 11 octaves. Pratiquement, la série des sons musicaux est comprise entre 40 et 4 000 vibrations par seconde, ce qui correspond en nombre rond à 7 octaves [2].

[1] L'erreur de Savart venait, suivant Helmholtz, de ce que, dans la disposition de son expérience, un des sons harmoniques que nous définirons dans la troisième leçon était pris pour le son fondamental. La détermination de la limite supérieure des tons perceptibles mérite d'être de nouveau soumise à l'expérience. Il est à craindre, en outre, que l'on n'ait pas encore établi clairement dans quelle proportion l'augmentation d'intensité peut avancer ou reculer la limite inférieure des sons perceptibles.

[2] Le son le plus grave des instruments d'orchestre est le *mi* de la contre-basse de 41 1/4 vibrations. Les pianos et les orgues modernes descendent ordinairement à l'ut_1 de 33 vibrations. Dans les grands pianos on trouve même un la_2 de 27 1/2 vibrations, et dans les grandes orgues toute une octave inférieure qui descend à l'ut_{-2} de 16 1/2 vibrations. Mais le caractère musical des notes au-dessous de mi_{-1} laisse à désirer, parce qu'elles touchent à la limite où l'oreille cesse de fondre les vibrations dans la sensation d'un son. A la limite opposée, le piano va jusqu'au la_6 de 3520 vibrations ; quelquefois même jusqu'a l'ut_7 de 4224 vibrations. La note d'orchestre la plus aigue est probablement le re_6 de la petite flûte de 4752 vibrations. (Helmholtz, p. 30.) Voici dans les notations allemande et française l'étendue de l'échelle des sons d'orchestre avec les nombres de vibrations simples et doubles :

C''	C'	C	D	E	F	G	A	H	c	c'	c''	c'''	c^iv	c^v
ut_{-2}	ut_{-1}	*ut*	*re*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	ut_2	ut_3	ut_4	ut_5	ut_6	ut_7
$16\frac{1}{2}$ v. s.	33	66							132	264	528	1056	2112	4224
33 v.d.	66	132							264	528	1056	2112	4224	8448

Les limites de là perception des sons varient chez les divers individus. Le docteur Wollaston, à qui nous devons la première démonstration de ce fait, remarqua, un jour qu'il essayait de déterminer la hauteur de sons très-aigus, que l'oreille d'un de ses amis présent à l'expérience était complétement insensible au son d'un très-petit tuyau d'orgue dont l'acuité était loin des limites ordinaires de la perception de l'oreille humaine. Pour cet ami, le sens de l'ouïe s'arrêtait à une note plus élevée de 4 octaves que le E, *mi* moyen du piano. Certaines personnes n'entendent pas le cri de la chauve-souris, le chant du grillon, ni même le piaillement aigu du moineau, quoique leur oreille soit très-sensible à la perception des sons graves.

Il suffit quelquefois de monter d'un seul ton pour faire succéder le silence au bruit. La soudaineté de transition, disait Wollaston, d'une audition parfaite à l'absence complète de sensation, cause un degré de surprise qui rend très-amusantes les expériences sur une série de petits tuyaux faites en présence de plusieurs personnes. Il est curieux d'examiner les impressions manifestées successivement par les divers individus, à mesure que le son s'approche des limites de leur perception ou la dépasse. Ceux qui se réjouissent du triomphe momentané qu'ils ont emporté sont bientôt forcés de reconnaître à quelle petite distance s'étend leur supériorité. Rien n'est plus surprenant, écrit sir John Herschel, que d'avoir à constater que, de deux personnes qui ne sont sourdes ni l'une ni l'autre, l'une se plaint de l'éclat trop pénétrant du son émis, tandis que l'autre déclare ne rien entendre du tout. Ainsi, tandis qu'une des personnes citées par Wollaston pouvait juste entendre la note à la quatrième octave du *mi* moyen du piano, d'autres avaient la perception distincte d'une note plus élevée encore de deux octaves. Le piaillement du moineau touche à la première limite; le cri de la chauve-souris est plus élevé d'un octave; celui de quelques insectes atteint probablement l'octave de cette octave. Dans mon ouvrage sur les glaciers des Alpes, j'ai rapporté un cas de portée très-faible de l'oreille, dont j'ai été témoin quand je traversais la montagne, près de Wengern, en compagnie d'un ami. L'herbe des deux côtés grouillait d'insectes, qui, pour moi, remplissaient l'air de leurs cris perçants. Mon ami, lui, n'entendait rien, la musique des insectes était bien au delà des limites de son ouïe.

Derrière la membrane du tympan, il existe une cavité remplie en partie par une chaîne d'osselets qui la traversent, en partie par de l'air : cette cavité communique avec la bouche par un conduit nommé la *trompe d'Eustache*. Ce conduit est en général fermé, et par suite l'air de la cavité situé au delà de la membrane ne communique pas avec l'air extérieur. Dans ces conditions, si l'air extérieur devient plus dense que celui de la cavité, il presse la membrane du tympan de dehors en dedans. Si, au contraire, l'air extérieur est plus rare, en même temps que la trompe d'Eustache est fermée, la membrane est pressée de dedans en dehors. Dans les deux cas on éprouve une douleur et l'on est à demi sourd. Un jour que je franchissais avec un ami le passage du Stelvio, je l'entendis se plaindre d'une vive douleur dans l'oreille ; je lui conseillai d'avaler sa salive, il le fit et la douleur disparut. Dans l'acte de la déglutition, la trompe d'Eustache s'était ouverte, et l'équilibre entre les pressions extérieure et intérieure se trouvait rétabli.

Nous pouvons suspendre en nous la faculté de percevoir les sons graves, en fermant le nez et la bouche, et dilatant la poitrine comme dans l'acte de l'inspiration. Cet effort fait un vide partiel dans l'espace situé au delà du tympan, et, par suite, l'air extérieur exerce sur cette membrane une pression de dehors en dedans. Nous pouvons encore produire cette impossibilité de percevoir les sons graves, en fermant le nez et la bouche, et faisant un très-grand effort d'expiration. En opérant ainsi, nous forçons l'air à pénétrer par la trompe d'Eustache dans le tambour de l'oreille, et la membrane est tendue de dedans en dehors par la pression de l'air intérieur. Si l'on fait cette expérience dans un wagon de chemin de fer, le roulement sourd du convoi cesse de se faire entendre ou est grandement affaibli; tandis que les sons plus aigus conservent toute leur intensité. Le docteur Wollaston était particulièrement habile à fermer la trompe d'Eustache, en laissant l'espace situé au delà du tympan rempli d'air comprimé ou raréfié. Il savait ainsi se rendre sourd à volonté pendant un temps indéfini, sans autre effort de sa part que d'empêcher l'acte de l'inglutition. Une commotion violente peut produire subitement la surdité, en forçant l'air d'entrer dans le tambour ou en l'en faisant sortir. Dans l'été de 1858, lorsque j'explorais les Alpes suisses, je sautai du sommet d'un rocher escarpé, sur ce que je croyais être un amas profond de neige, et je tombai violemment sur un autre rocher à peine recouvert de neige. Aussitôt le sifflement du vent, le murmure du torrent du glacier, tous les autres bruits qu'un beau jour de soleil éveille sur les montagnes cessèrent pour moi. J'entendais à peine la voix de mes guides. Cette surdité dura une demi-heure; ce temps écoulé, je parvins enfin par une manœuvre convenable à rouvrir la trompe d'Eustache, et je fis ainsi renaître comme par un coup de baguette magique les innombrables murmures qui remplissaient l'air tout autour de moi.

La lumière, ainsi que le son, a pour cause des pulsations ou des ondes; et les lumières de couleurs diverses, comme les sons de tons différents, naissent de périodes de vibrations différentes. Mais au point de vue de l'étendue de la perception, l'oreille l'emporte de beaucoup sur l'œil ; car, tandis que la sensibilité de l'oreille s'étend à plus de 11 octaves, celle de l'œil dépasse à peine une octave. Les vibrations lumineuses les plus rapides parmi celles qui impressionnent l'œil, en tant que lumière, ont à peine une vitesse double de celle des vibrations lumineuses les plus lentes ; au contraire, les vibrations les plus rapides sensibles à l'oreille ont plus de deux mille fois la vitesse des vibrations les plus lentes[1].

Revenons à la sirène double de M. Helmholtz. Il a voulu qu'on pût faire tourner non-seulement le disque de la sirène supérieure, mais encore le cylindre *a* au-dessus de ce disque. On y parvient par la combinaison d'une roue dentée et d'un pignon, mus par une manivelle E.

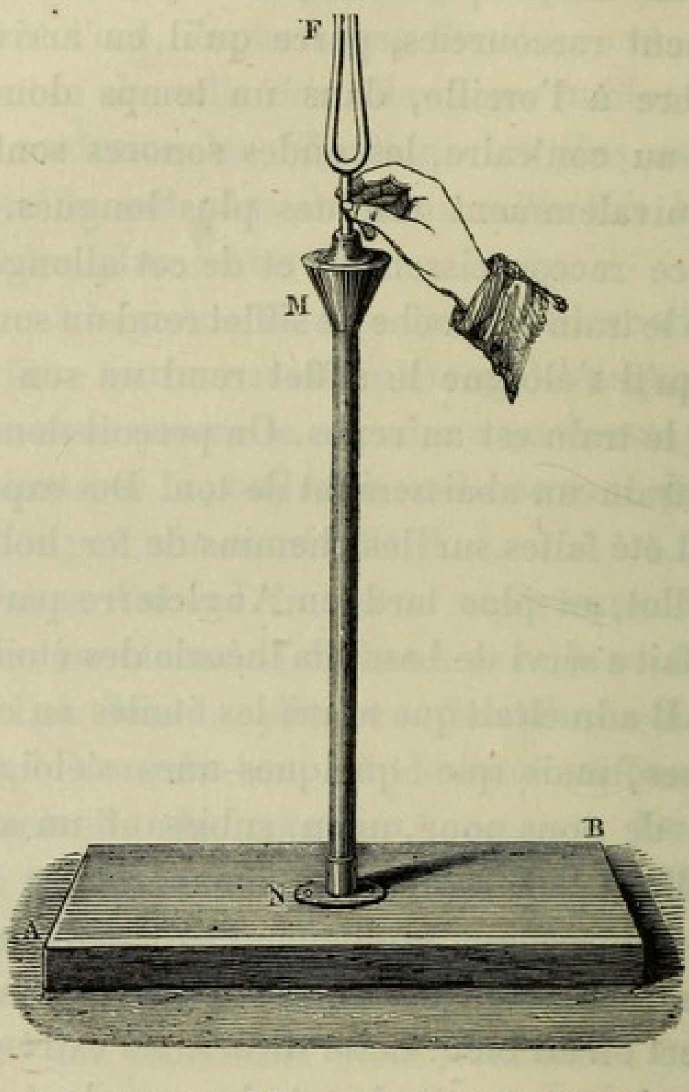
Considérons d'abord la sirène supérieure. On relie par un tuyau en caoutchouc l'orifice A avec la soufflerie, et l'on fait entrer l'air dans le cylindre *a*. Son disque mobile tourne, et bientôt le ton du son est devenu uniforme. Agissons sur la manivelle de manière à amener les orifices du cylindre *a* à coïncider avec ceux du disque. Il est évident que par cette disposition les deux séries d'ouvertures passeront plus rapidement l'une devant l'autre que lorsque le cylindre restait immobile. Nous constatons en effet que le ton s'élève aussitôt que l'on tourne la manivelle. Si nous faisons tourner la manivelle en sens contraire, nous ferons que les ouvertures passent plus lentement l'une au-dessus de l'autre, et nous constaterons que le ton du son s'abaisse aussitôt. En imprimant ainsi à la manivelle des mouvements alternatifs de gauche à droite et de droite à gauche, on fait

[1] Il est à peine nécessaire de noter que les vibrations les plus rapides correspondent à la couleur violette, et les plus lentes à la couleur rouge ; ces couleurs forment les deux extrêmes du spectre.

monter ou baisser à volonté le ton du son rendu. On peut observer, à chaque station de chemin de fer, un effet de ce genre extrêmement instructif, au moment du passage d'un train de grande vitesse. Pendant qu'il approche, les ondes sonores émises par le sifflet sont virtuellement ou équivalemment raccourcies, parce qu'il en arrive un plus grand nombre à l'oreille, dans un temps donné. Quand il s'éloigne au contraire, les ondes sonores sont virtuellement ou équivalemment rendues plus longues. La conséquence de ce raccourcissement et de cet allongement sont que, lorsque le train approche, le sifflet rend un son plus aigu, et que lorsqu'il s'éloigne le sifflet rend un son plus grave que lorsque le train est au repos. On perçoit donc à chaque passage du train un abaissement de ton. Des expériences de ce genre ont été faites sur les chemins de fer hollandais par M. Buys-Ballot, et plus tard en Angleterre par M. Scott-Russel. Ce fait a servi de base à la théorie des étoiles colorées de Doppler. Il admettait que toutes les étoiles en elles-mêmes sont blanches, mais que quelques-unes s'éloignent assez rapidement de nous pour qu'en subissant un allongement d'onde suffisant leur lumière devienne rouge ; tandis que d'autres se rapprochant rapidement subissent dans leur lumière un raccourcissement assez sensible pour les faire passer au vert ou au bleu. Cette théorie est extrêmement ingénieuse ; mais son exactitude est plus que douteuse.

Nous avons étudié jusqu'ici la transmission des sons musicaux à travers l'air. Les sons sont aussi fidèlement transmis par les liquides et les solides. Pour le prouver je place ce verre à boire sur la table et je le remplis d'eau. J'excite le diapason pour le faire entrer en vibration. A l'exception des personnes placées très près de moi, aucune n'a la conscience du son qu'il rend. Le diapason est vissé sur un petit pied en bois que je plonge en ce moment dans l'eau, sans lui permettre de toucher les parois du verre. Vous entendez immédiatement un son musical. Voici un tube MN (*fig.* 24) d'un mètre, dressé

Fig. 24.



verticalement sur une table en bois AB. Le tube se termine en entonnoir, et je le remplis d'eau jusqu'au bord. Comme précédemment, je fais vibrer le diapason et je plonge son pied dans l'eau de l'entonnoir au sommet du tube, vous entendez tous un son musical. Je dois vous dire ici, par anticipation sur ce que nous prouverons plus tard, que dans cette expérience le véritable corps sonore est la table de bois AB; elle est mise en vibration par le diapason, mais les vibrations lui sont transmises *par l'intermédiaire de l'eau.*

C'est par un milieu semblable que les vibrations sont transmises au nerf auditif dont les filaments terminaux flottent au sein d'un liquide. En substituant le mercure à l'eau, on obtiendrait le même résultat.

La sirène doit son nom à la propriété qu'elle possède de chanter sous l'eau. Voici un grand vase à moitié rempli d'eau dans laquelle une sirène est complétement immergée. En tournant ce robinet, je fais arriver dans l'instrument un courant d'eau fourni par le conduit d'alimentation de cet édifice ; son disque s'anime d'un mouvement de rotation, et un son musical dont le ton monte très vite sort du sein de l'eau. Le ton s'élève ainsi rapidement, parce que l'eau pesante et fortement pressée communique au disque sa vitesse maximum de rotation. Je ferme en partie le robinet, l'eau arrive moins abondante et le ton baisse. En ouvrant et fermant ainsi alternativement le robinet, on fait monter et baisser le chant de la sirène, qui prend alors un caractère de sauvage mélancolie. Vous n'accorderiez pas à cette musique si triste la faculté de fasciner assez les navigateurs pour les entraîner vers l'abîme.

La transmission du son par les corps solides trouve de même sa démonstration dans des expériences faciles et intéressantes. Voici une baguette en bois, longue d'une dizaine de mètres : partant de cette table, elle traverse le plafond, et va aboutir à une terrasse en plein air. Son extrémité inférieure est engagée dans une pièce plate en bois posée sur la table, et elle se prêtera, je l'espère, à transmettre à cette sorte de table d'harmonie le son rendu par un corps vibrant mis en contact avec son extrémité supérieure. Mon préparateur est sur la terrasse, tenant à la main un diapason ; il frappe contre un corps solide le diapason, qui entre en vibration, mais nous n'entendons rien. Il applique le pied du diapason sur l'extrémité de la tringle et aussitôt la table d'harmonie rend un son musical très distinct. Le ton de ce son est d'ailleurs exactement le ton du diapason, le bois par rapport au diapason est purement passif. Il transmet sans altération aucune les vibrations qu'il a reçues. Quand on substitue un second diapason au premier, on entend un son de ton différent. Appliquons cinquante diapasons au lieu de deux, faisons la tringle longue de 100 mètres au lieu de 10 mètres, le bois transmettra toujours fidèlement les vibrations qu'il aura reçues, et pas d'autres.

Nous sommes actuellement en mesure d'apprécier une belle expérience due à M. le professeur Wheatstone, et que je suis heureux de pouvoir exécuter devant vous. Dans une salle située au rez-de-chaussée, et dont nous sommes séparés par deux étages, se trouve un piano. A travers les deux plafonds passe un tube de fer-blanc de 6 à 7 centimètres de diamètre, traversé suivant son axe par une longue baguette de sapin, dont une extrémité sort du plancher en avant de cette table. La baguette est entourée d'une bande de caoutchouc de manière à remplir entièrement le tube de fer-blanc; l'extrémité inférieure de la baguette repose sur la table d'harmonie du piano. Un artiste joue actuellement un morceau de musique, mais vous n'entendez aucun son. Je pose ce violon sur l'extrémité de la baguette, et voici que le violon rend à son tour l'air joué par l'artiste, non par les vibrations de ses cordes, mais par les vibrations du piano. J'enlève le violon, la musique cesse ; je mets à sa place une guitare, et la musique recommence. Au violon et à la guitare, je substitue une table de bois, elle rend à son tour tous les sons du piano. Voici enfin une harpe, j'appuie sa table d'harmonie contre l'extrémité de la baguette, et vous entendez encore chacune des notes du piano. Je soulève assez la harpe pour qu'elle ne soit plus en communication avec le piano, le son s'éteint. Les sons du piano ressemblent tant à ceux de la harpe, qu'il est difficile de se défendre de l'impression que la musique que l'on entend n'est pas celle de ce dernier instrument. Une personne sans éducation croirait bien certainement à l'intervention d'un sorcier dans cette transmission si merveilleuse.

Quel curieux transport d'action se présente ici à notre esprit! Au commandement de la volonté de l'artiste ses doigts abaissent les touches du piano, les marteaux frappent les cordes, qui transforment en vibrations sonores les chocs purement mécaniques. Ces vibrations sonores se communiquent à la table d'harmonie du piano. Sur cette table pose l'extrémité de la baguette de sapin amincie sur ses bords pour qu'elle passe plus facilement entre les cordes, aussitôt les pulsations rapides et confuses des dix doigts entrent par ce bord dans la baguette et sont conduites par elle avec une précision infaillible. La baguette à son tour communique à la table d'harmonie de la harpe les vibrations qu'elle a si bien conduites. Cette seconde table d'harmonie transmet le mouvement à l'air, sous des formes ou arrangements de molécules si transcendants et si complexes qu'on ne saurait attendre que de la confusion de ces mille ondes sonores qui se choquent et se heurtent en tous sens. Mais la merveilleuse oreille humaine est là apte à vibrer à l'unisson de toutes ces formes de mouvements si diverses. Et voici que la lutte, le combat et la confusion se traduisent dans le cerveau en musique et harmonie [1].

[1] Dans cette expérience, on peut remplacer le piano par une simple boîte de musique.

RÉSUMÉ DE LA LEÇON II.

Un son musical est produit par des chocs sonores qui se suivent à des intervalles réguliers avec une rapidité suffisante.

Le bruit est produit par une succession irrégulière de chocs sonores.

Un son musical peut être produit par des coups qui se suivent rapidement et régulièrement. Les chocs d'une carte contre les dents d'une roue qui tourne sont souvent employés pour mettre ce fait en évidence.

Un son musical peut encore être produit par une succession de *souffles* ou bouffées d'air. La sirène est un instrument qui sert à engendrer ces souffles.

Le degré d'élévation d'une note musicale ne dépend que du nombre des vibrations exécutées dans un temps donné. Plus les vibrations sont rapides, plus la note est élevée.

Au moyen d'une sirène, on peut déterminer la vitesse de vibration d'un corps sonore quelconque. Il suffit de faire monter le son de la sirène à l'unisson du ton du corps, de maintenir l'unisson quelque temps, et de lire sur le compteur annexé à la sirène combien il s'est produit de souffles pendant ce temps. Le nombre des souffles est celui des vibrations accomplies par le corps sonore.

Lorsqu'on fait vibrer un corps qui émet un son musical, par exemple un diapason, il se produit dans l'air environnant des ondes sonores, dont chacune se compose d'une condensation et d'une raréfaction.

La longueur de l'onde sonore se mesure de condensation en condensation, ou de raréfaction en raréfaction.

On obtient la longueur de l'onde sonore en divisant le chemin parcouru par le son dans une seconde par le nombre de vibrations exécutées dans cette seconde.

C'est ainsi qu'on trouve, par exemple, qu'un diapason qui vibre 256 fois par seconde produit dans de l'air à 15°, où la vitesse du son est de $341^{m},3$ par seconde, des ondes dont la longueur est de $1^{m},320$; tandis que deux autres diapasons, vibrant respectivement 320 fois et 384 fois par seconde, engendrent des ondes dont les longueurs sont $1^{m},066$ et $0^{m},889$.

Une vibration, telle qu'on la définit en Angleterre et en Allemagne, comprend à la fois un mouvement en avant et un mouvement en arrière. En France, on appelle vibration un seul de ces deux mouvements, c'est-à-dire une moitié de vibration anglaise. La vibration complète des Allemands et des Anglais s'appelle aussi *oscillation* ou *ondulation;* la vibration française n'est qu'une demi-oscillation ou une demi-ondulation.

Le temps exigé par une molécule d'air sur laquelle passe une onde sonore pour exécuter une vibration complète, est le temps qu'emploie l'onde à parcourir un espace égal à sa propre longueur,

Plus la température de l'air est élevée, plus l'onde sonore a de longueur pour une même vitesse de vibration. Etant données la longueur d'onde et la vitesse de vibration, on en conclut facilement la température de l'air.

L'oreille humaine ne perçoit les sons musicaux qu'entre certaines limites. Si le nombre des vibrations par seconde est de moins de 16, l'oreille ne perçoit que des chocs séparés. S'il est de plus de 38 000, l'oreille ne perçoit plus aucun son. Les sons perceptibles aux meilleures oreilles forment une échelle d'environ 11 octaves, mais les organes auditifs qui ne perçoivent que 6 ou 7 octaves ne sont pas très-rares.

Les sons véritablement admissibles en musique sont produits par des vibrations comprises entre les limites de 40 à 4000 vibrations par seconde. Ils embrassent 7 octaves.

La puissance de perception ou la portée de l'oreille dépasse de beaucoup celle de l'œil, à peu près limitée à une octave.

Au moyen de la trompe d'Eustache, qui s'ouvre dans l'acte de la déglutition de la salive, on parvient à faire que les pressions sur les deux faces du tympan soient inégales.

On peut rendre l'oreille insensible aux sons les plus graves en condensant ou raréfiant l'air derrière la membrane du tympan.

Quand un train de chemin de fer s'approche de nous, le son du sifflet de la locomotive nous paraît plus aigu que lorsque la locomotive est en repos; le contraire a lieu quand le train s'éloigne de nous.

Les sons musicaux peuvent être transmis par les liquides et les solides; ils peuvent l'être d'une chambre à une autre, du rez-de-chaussée au grenier d'une maison de plusieurs étages, sans être entendus dans les chambres ou les étages intermédiaires; une longue solive peut suffire pour opérer cette transmission.

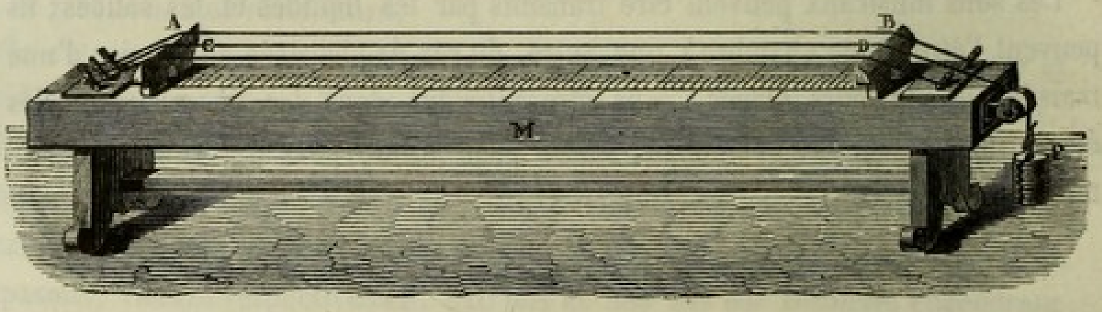
LEÇON III.

Vibrations des cordes. — Comment on les emploie en musique. — Influence des tables d'harmonie. — Lois des cordes vibrantes. — Leur mise en évidence sur une grande échelle. — Combinaisons des impulsions directes et réfléchies. — Ondes stationnaires et progressives. — Nœuds et ventres ou segments vibrants. — Expériences de M. Melde. — Cordes mises en vibration par des diapasons. — Lois des vibrations ainsi démontrées. — Tons harmoniques des cordes. — Définition du ton, du timbre ou de la qualité du son des tons harmoniques. — Extinction de certains tons harmoniques. — Conditions qui affectent l'intensité des tons harmoniques. — Examen optique des vibrations d'une corde de piano.

Le but de cette leçon est d'étudier les vibrations des cordes ou des fils métalliques, d'apprendre comment les corps de cette forme peuvent devenir des sources de sons musicaux, et de découvrir les lois de leurs vibrations.

Pour qu'une corde puisse vibrer transversalement, il faut qu'elle soit tendue entre deux points fixes. La figure 25 représente l'instrument ordinairement employé à tendre les

Fig. 25.



cordes de manière à faire entendre leurs vibrations. Partant d'un crochet auquel elle est solidement attachée, la corde AB passe sur les chevalets C et D, et s'engage ensuite dans la gorge d'une poulie libre autour de son axe ; elle est finalement tendue par un poids D de 14 kilogrammes suspendu à sa seconde extrémité. Les chevalets C et D, qui déterminent la longueur réelle de la corde vibrante, sont collés à une caisse vide en bois M. L'instrument complet se nomme monocorde ou *sonomètre*.

Saisissons la corde tendue AB par son point milieu, tirons à nous et lâchons-la subitement : c'est ce que nous appellerons désormais *pincer* la corde. Après avoir été ainsi pincée, la corde revient à sa position première, la dépasse, s'arrête, revient à sa première position par un mouvement rétrograde, la dépasse encore pour y revenir de nouveau, et osciller ainsi pendant un certain temps, en avant et en arrière de sa position d'équilibre. On entend un son, et de près on voit très-distinctement les limites entre lesquelles la corde oscille. Les ondes sonores qui frappent l'oreille ne viennent pas immédiatement de la corde. La quantité de mouvement communiquée à l'air par un corps si mince n'est pas assez intense pour devenir sensible à quelque distance. Mais la corde presse fortement contre les chevalets, et, quand elle vibre, ses frémissements sont transmis par ces chevalets à la masse totale de la caisse M ainsi qu'à l'air que la caisse contient; la caisse, et l'air contenu dans ses flancs deviennent alors de véritables corps sonores.

On démontre expérimentalement, de la manière suivante, que les vibrations seules de la corde ne suffisent pas à produire le son : — AB (*fig.* 26) est une pièce de bois placée transversalement sur un tasseau en fer C. De chaque extrémité de la pièce de bois pend une corde se terminant en anneau, et dans les deux anneaux on engage les extrémités d'une barre de fer *mn*. Au milieu de cette barre est suspendu un fil d'acier *ss'*, tendu par un poids de 14 kilogrammes. Dans cette disposition, le fil métallique se trouve isolé de toute grande surface à laquelle il pourrait communiquer ses vibrations. Un second fil *tt'* (*fig.* 27), de même longueur que le précédent, de même épaisseur et de même matière, est fixé par une de ses extrémités à la tablette de bois AB ; ce fil supporte aussi un poids de 14 kilogrammes.

Fig. 26.

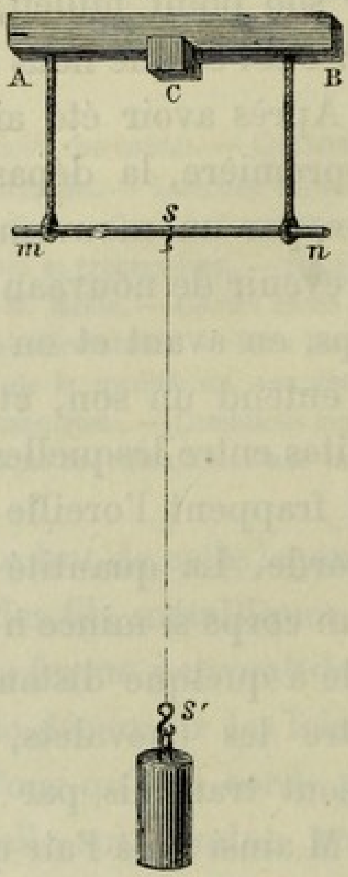
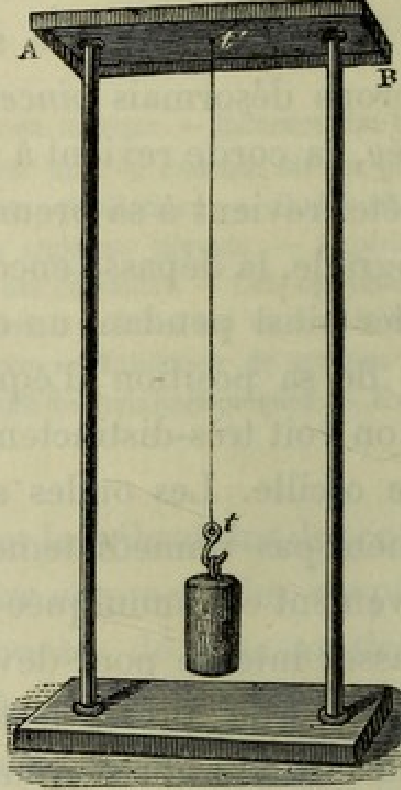


Fig. 27.



On pince le fil ss' (*fig.* 26). Il vibre avec force, mais ses vibrations ne sont pas entendues des personnes les plus rapprochées de l'appareil. L'agitation qu'il produit dans l'air est trop faible pour affecter les nerfs auditifs, même à de petites distances. On fait vibrer le fil tt' (*fig.* 27), et le son qu'il produit est entendu de tous. Bien que le fil ne presse la planche AB que par son extrémité, les vibrations qu'il lui transmet suffisent pour la convertir en corps sonore. Enfin, pinçons le fil AB du sonomètre M (*fig.* 25), et, cette fois, le son sera plein et retentissant, parce que l'instrument est construit spécialement pour emmagasiner et renforcer les vibrations de la corde.

Ces expériences mettent en évidence la nécessité d'employer dans les instruments à cordes des appareils sonores convenablement choisis. Ce ne sont pas les cordes d'une harpe, d'un luth, d'un piano ou d'un violon qui impriment immédiatement à l'air les vibrations sonores : ce sont les larges surfaces auxquelles les cordes sont associées, et l'air renfermé entre ces surfaces. La bonté de ce genre d'instrument dépend presque entièrement de la qualité et de la disposition de leurs tables d'harmonie[1].

Prenons le violon pour exemple. La caisse de cet instrument doit être faite de bois parfaitement élastique ; s'il ne l'était que faiblement, une partie du mouvement qu'il recevrait se consommerait en frottement de ses propres molécules, et serait convertie, non plus en son, mais en chaleur. Les cordes du violon partant du *cordier* ou *queue* de l'instrument passent sur le *chevalet*, et se rendent aux *chevilles* du manche autour desquelles elles s'enroulent ; en tournant ces chevilles dans un sens ou dans l'autre, on règle la tension des cordes. On applique l'archet en un point des cordes dont la distance au chevalet est environ le dixième de leur longueur totale. Les deux jambes du chevalet sont pressées contre la partie la plus flexible de la table du violon, celle qui est située entre les deux ouvertures en forme de *f*. Une de ces jambes appuie fortement sur une courte tige, l'*âme* du violon, fixée debout dans l'intérieur entre la table et le fond. Cette jambe est rendue ainsi rigide ; c'est principalement par l'autre jambe non appuyée, que les vibrations des cordes sont transmises aux parois et à l'air intérieur de la caisse qui les transmettent à l'air extérieur. Les change-

[1] Pour démontrer l'influence des larges surfaces vibrantes sur l'intensité des ondes sonores de l'air, M. Kilburn renferme une boîte à musique dans un étui de feutre épais. Une tige de bois qui s'appuie sur la boîte à musique passe à travers l'enveloppe de feutre. Or, quand la boîte joue un air, on ne l'entend pas, aussi longtemps qu'on n'ajoute rien à la tige de bois; mais dès que l'on appuie sur son extrémité un disque mince de bois, on entend aussitôt la succession des notes musicales.

ments moléculaires que l'âge produit dans la constitution du bois ne sont pas sans importance. De même qu'un disque ou plateau de verre ne donne pas aujourd'hui par le frottement la quantité d'électricité qu'il donnait il y a un an, ou qu'il donnera l'année prochaine, parce que son état moléculaire, et par suite ses qualités électriques, se modifient sans cesse; de même la sonorité, les qualités sonores d'un violon s'améliorent avec le temps, et ses sons avec l'âge deviennent plus moelleux. En outre, l'acte de jouer le violon a sur lui la plus heureuse influence; il force en quelque sorte les molécules du bois, d'abord réfractaires, à se plier à toutes les exigences des cordes vibrantes.

Après avoir appris comment les vibrations des cordes peuvent être utilisées pour la production des sons musicaux, cherchons à découvrir les lois de ces vibrations. Saisissant par son milieu la corde AB, pinçons-la et lâchons-la (*fig.* 25) : le son que l'on entend est le son fondamental, ou la note la plus basse que puisse rendre la corde, elle le produit en vibrant tout entière, animée d'un mouvement de va-et-vient. Dressons en son milieu un chevalet mobile qui la presse fortement, et elle se divisera en deux parties égales. Pinçons en son milieu l'une ou l'autre de ces deux moitiés, et nous obtiendrons un son musical que l'oreille reconnaît être l'octave de la note fondamentale précédente. Or, c'est une loi générale, et pour tous les instruments, que l'octave d'une note est produite par un nombre double de vibrations. On peut d'ailleurs démontrer par la théorie, et vérifier par l'emploi de la sirène, que cette demi-corde a en effet une vitesse de vibration exactement double de celle de la corde entière. On prouverait de la même manière que le tiers de la corde vibre avec une vitesse trois fois plus grande et produit une note qui est la quinte au-dessus de l'octave, tandis que le quart de la corde vibre avec une vitesse quadruple, produisant la double octave du son de la corde entière. En général, *le nombre des vibrations d'une corde est inversement proportionnel à sa longueur.*

D'autre part, plus est grande la tension de la corde, plus ses vibrations sont rapides. Si l'on fait vibrer cette corde dont la tension est relativement lâche, on entend sa note fondamentale. Si, tournant une cheville sur laquelle s'enroule l'extrémité de la corde, on tend un peu plus la corde, la note est plus élevée. Saisissons de la main gauche le poids P attaché au fil AB du sonomètre, et faisons vibrer ce fil en le pinçant de la main droite, en même temps que nous agirons sur le poids pour le faire descendre ou le soulever. Les variations rapides de la tension sont exprimées par les variations du son tour à tour plus élevé ou plus bas. Le nombre des vibrations exécutées dans l'unité de temps est d'ailleurs dans un rapport déterminé avec le degré de tension de la corde. En appliquant successivement différents poids à l'extrémité du fil AB, et mesurant dans chaque cas le nombre des vibrations exécutées en une seconde, on trouve que *les nombres ainsi obtenus sont proportionnels aux racines carrées des poids tendeurs.* Si, par exemple, une corde tendue par un poids de 1 kilogramme exécute un certain nombre de vibrations par seconde, pour doubler ce nombre de vibrations il faudra tendre la corde par un poids de 4 kilogrammes; si nous voulons le tripler, nous devrons appliquer un poids de 9 kilogrammes, et ainsi de suite.

Les vibrations d'une corde dépendent aussi de son épaisseur. En supposant invariable le poids tendeur, la longueur et la matière de la corde, *le nombre des vibrations varie en raison inverse de son épaisseur ou de son diamètre.* Si donc, de deux cordes de même matière, également longues et également tendues, l'une a deux fois le diamètre de l'autre, la corde la plus mince exécutera un nombre double de vibrations dans le même temps que la plus épaisse. Si le diamètre de l'une est trois fois le diamètre de l'autre, la seconde exécutera trois fois plus de vibrations que la première, et ainsi de suite.

Enfin, les vibrations d'une corde dépendent de la densité de la matière dont elle est faite. Un fil de platine et un fil de fer, par exemple, de même longueur, de même épaisseur, tendus par des poids égaux, ne vibrent pas avec la même vitesse. Cette différence tient à ce que le poids spécifique du fer, ou sa densité, est 7,8, tandis que celle du platine est 21,5. Toutes les autres conditions restant les mêmes, *le nombre des vibrations est inversement proportionnel à la racine carrée de la densité de la corde*. Par conséquent, si la densité d'une corde est le quart de celle d'une autre corde de même longueur, épaisseur et tension, elle exécutera ses vibrations deux fois plus vite; si la densité de la première corde est un neuvième de celle de la seconde, elle vibrera avec une vitesse triple, et ainsi de suite. Les deux dernières lois prises ensemble, peuvent s'énoncer comme il suit :

Le nombre des vibrations est inversement proportionnel à la racine carrée du poids de la corde.

Dans le piano et la plupart des autres instruments à corde, on demande les sons graves à l'augmentation d'épaisseur plutôt qu'à l'augmentation de longueur. Dans le violon et la basse, pour produire les sons les plus graves, on n'augmente pas seulement l'épaisseur des cordes, on les rend plus lourdes en enroulant autour d'elles une matière étrangère. Elles ressemblent aux chevaux des hippodromes dont les jockeys sont surchargés, et qui courent plus lentement en raison du poids plus grand qui fait obstacle à leur force musculaire.

Telles sont les quatre lois qui régissent les vibrations transversales des cordes. Considérons maintenant quelques phénomènes analogues, qui, bien que se rattachant à des considérations mécaniques plus complexes, peuvent cependant être suffisamment saisis sans exiger d'attention trop soutenue, et qu'il importe grandement de maîtriser si l'on veut arriver à comprendre parfaitement la théorie des instruments à cordes.

Du plafond *c* de cette salle (*fig.* 28), descend un tube en

Fig 28.

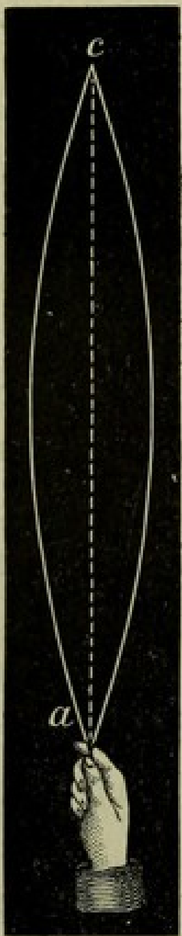
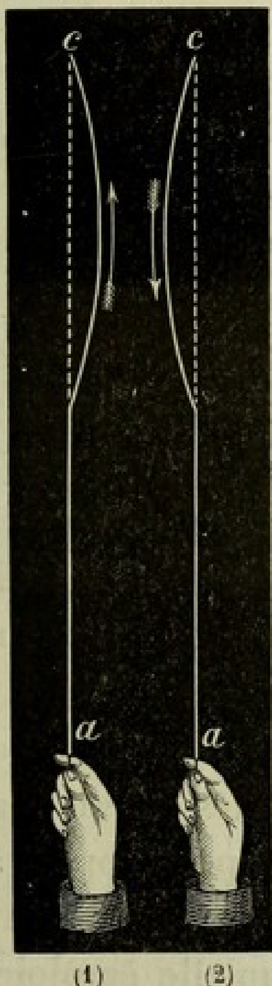


Fig. 29.



caoutchouc de 9 mètres de longueur. On l'a rempli de sable, afin de rendre ses mouvements plus lents et plus faciles à suivre du regard. On saisit son extrémité libre *a*, on l'étire quelque peu, et, par une série d'impulsions convenablement distribuées, on arrive à le faire osciller comme un tout animé d'un mouvement de va-et-vient, ainsi que la figure l'indique. Ce mouvement a son temps propre de vibration qui dépend de la longueur, du poids, du diamètre, de la tension du tube, et sur lequel les impulsions de la main doivent se régler.

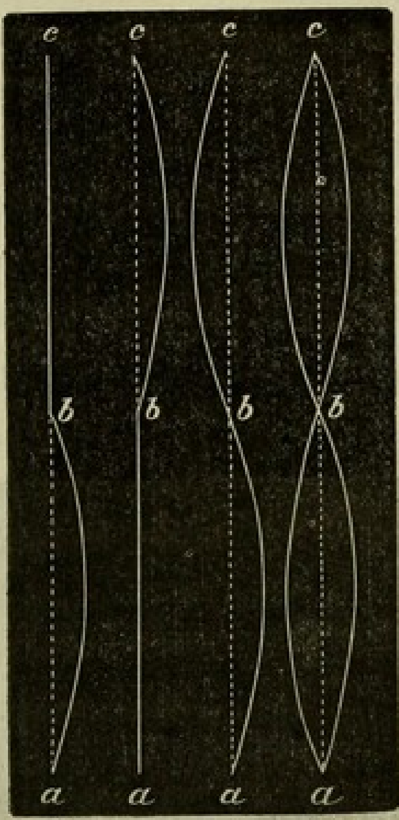
Arrêtons le mouvement et, par une vive secousse, faisons naître sur le tube une protubérance qui parcourt en montant toute sa longueur, arrive à l'extrémité fixe, se renverse ou change de côté, descend et revient à la main. La pulsation, arrivée à l'extrémité fixe, change à la fois, conformément aux lois de la réflexion, sa position et la direction de son mouvement.

Supposons que *c* (*fig.* 29) soit l'extrémité fixe, et *a* l'extrémité tenue dans la main. Si, en arrivant au point *c*, la pulsation a la position représentée par (1), après sa réflexion en *c* elle aura la position représentée par (2). Les flèches indiquent le sens de sa marche. Le temps nécessaire pour que la pulsation passe de la main à l'extrémité *c*, et revienne à la main, est exactement égal à la durée d'une oscillation complète du tube oscillant sur toute sa longueur, comme dans la première expérience.

Si, au lieu d'une seule secousse, nous imprimons au tube une succession de secousses, de manière à lancer le long du tube une série de pulsations, chacune de ces pulsations sera réfléchie en haut, au point d'attache, et il s'agit d'examiner comment les ondulations directes et réfléchies se comporteront l'une par rapport à l'autre.

Envoyons le long du tube une première pulsation, et supposons qu'elle emploie une seconde à passer de la main à l'extrémité fixe. Au bout d'une demi-seconde, elle occupe la position *ab* (1) (*fig.* 30); son point le plus avancé a atteint le milieu du tube. A la fin de la seconde entière, elle occupera la position *bc* (2); son point le plus avancé aura atteint l'extrémité du tube. A l'instant où la réflexion commence en *c*, imprimons une nouvelle secousse en *a*. Comme la pulsation réfléchie se meut à partir de *c* avec la même vitesse que la pulsation directe partant de a, les points les plus avancés ou les têtes de l'une et de l'autre arriveront dans le même instant au centre b (3) du tube. Que va-t-il arriver ? L'arc ascendant

Fig. 30



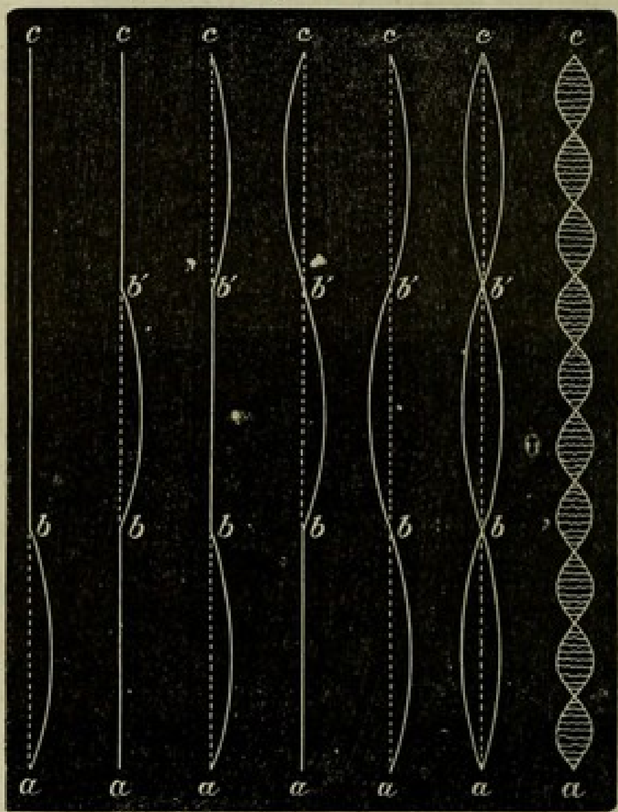
(1) (2) (3) (4)

ab tend à aller en c et à porter le point b du tube vers la droite ; l'arc descendant cb tend à aller en a, et à entraîner le point b vers la gauche ; ce point b, sollicité en même temps dans deux directions contraires par des forces égales et opposées, ne se mouvra dans aucune de ces deux directions ; il restera fixe, et les deux moitiés ab, bc du tube oscilleront comme si elles étaient indépendantes l'une de l'autre (4). Ainsi, par la combinaison de deux *pulsations progressives*, l'une directe et l'autre réfléchie, nous faisons naître dans le tube ac deux *pulsations* ou *impulsions permanentes* qui se neutralisent à leur point de rencontre. Les portions vibrantes ab, bc reçoivent le nom de *segment vibrant* ou *ventre;* les points sans vibration b sont appelés des *nœuds*.

Nous nous sommes servi à dessein du mot *pulsations*, de crainte de produire quelque confusion dans les esprits en employant le terme usuel *ondulation*. Car une ondulation embrasse deux de ces pulsations, elle comprend à la fois et la protubérance ou relief, et le creux qui suit immédiatement le relief. La longueur d'une onde, par conséquent, est double de celle d'un segment vibrant.

Supposons que les secousses soient tellement rhythmées que chaque protubérance soit le tiers de la longueur totale du tube. A la fin du premier tiers de seconde, la pulsation occupera la position *ab* (1). Après deux tiers de seconde, elle aura atteint la position *bb'* (2) (*fig*. 31). Supposons qu'à ce mo-

Fig 31.



ment une nouvelle impulsion parte de *a*. Au bout d'une seconde entière, nous aurons sur le tube deux protubérances, l'une en *ab* (3), l'autre en *b'c* (3).

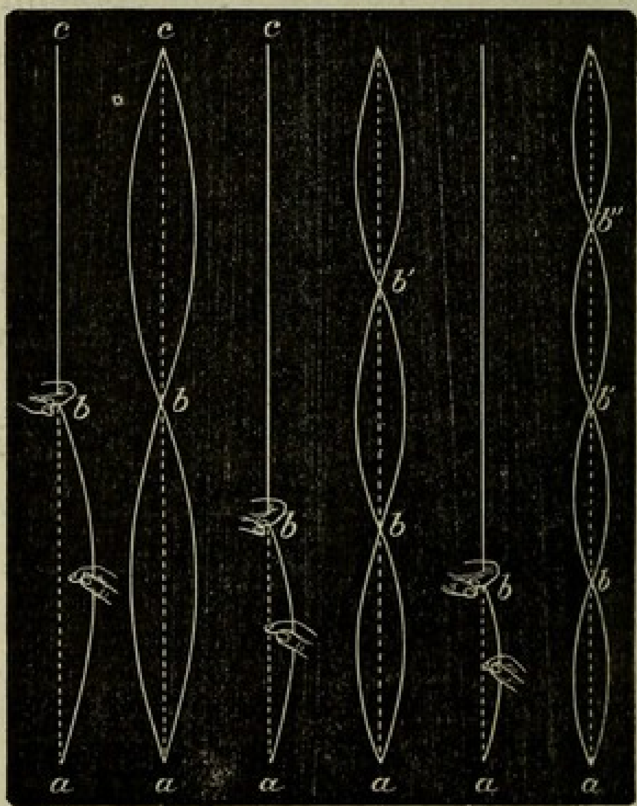
Il est évident que l'extrémité de la pulsation réfléchie *cb* et l'extrémité de l'impression directe venue de *a* atteindront au même moment le point b'. L'état actuel des choses sera donc représenté en (4). Sous l'action simultanée et de sens contraire des deux pulsations, le point b' restera immobile ; et *à partir de ce point, comme s'il était fixe, l'impulsion bb' semblera avoir été réfléchie, tandis que le segment $b'c$ oscillera comme une corde indépendante*. Supposons qu'à l'instant où $b'b$ (4) commence à être réfléchi au point b', il parte une nouvelle impulsion de a ; elle atteindra b (5) en même temps que l'impulsion réfléchie, les deux pulsations se neutraliseront mutuellement en b, qui deviendra un second nœud. Ainsi, en rhythmant convenablement nos secousses, nous diviserons la corde en trois segments ou ventres, séparés les uns des autres par deux nœuds. Aussi longtemps que ces impulsions seront produites, le tube vibrera comme en (6).

Théoriquement, il n'y a pas de limite au nombre des nœuds et des ventres que l'on peut ainsi obtenir. En précipitant la pulsation, on diviserait le tube en quatre ventres séparés par trois nœuds, ou en cinq ventres avec quatre nœuds. Le tube sur lequel nous opérons est même assez long pour qu'on puisse obtenir dix ventres, comme l'indique la figure 31 (7). Quand la force de tension est constante, le nombre des ventres est proportionnel à la rapidité de la vibration de la main. Pour obtenir 2, 3, 4, 10 ventres, il faut 2 fois, 3 fois, 4 fois, 10 fois la rapidité de vibration nécessaire pour que le tube oscille dans son entier. Quand la vibration est très-rapide, les ventres apparaissent comme une série de fuseaux ombrés, séparés par des points noirs immobiles. L'expérience est très-belle et facile à exécuter.

Il est clair qu'on peut remplacer l'action de la main par celle d'un moteur oscillant de puissance assez grande, et dont les périodes de vibrations aient la durée convenable. Par exemple, si l'on a fixé une des extrémités d'une tige métallique dans un étau, ou mieux, si on l'a vissée sur une enclume ou bloc de fer assez massif, puis que l'on attache le bout libre de la tige à l'extrémité du tube de caoutchouc, on arrivera, en augmentant ou diminuant la longueur de la tige, à rendre ses vibrations synchroniques de celles du tube, et on pourra amener ce tube soit à osciller comme un tout, soit à se diviser en un nombre quelconque de parties oscillantes.

Les ondes stationnaires ont été d'abord traitées expérimentalement par MM. Weber, dans leurs excellentes recherches sur le mouvement ondulatoire. L'étude que nous en ferons nous dédommagera de l'attention que nous lui aurons donnée, en rendant parfaitement intelligibles à notre esprit les phénomènes les plus délicats de la musique des cordes. Afin de rendre plus saisissable la liaison entre les deux classes de vibration, modifions nos dernières expériences. Prenons

Fig. 32.



un tube de caoutchouc long de 3 à 4 mètres (*fig.* 32), fixé à deux crochets en *a* et *c* et tendu. Ce tube est noirci, et pour rendre ses mouvements plus visibles, on a placé en arrière une feuille de papier blanc; on entoure le tube en son point milieu d'un cercle formé de l'union du pouce et de l'index de la main gauche; puis, pinçant de la main droite la moitié *ba* en son milieu, on l'écarte et on la lâche. De cette manière la moitié inférieure n'oscille pas seule, la moitié supérieure est aussi mise en vibration. On retire la main gauche, et les deux moitiés *ab*, *cd* du tube continuent à osciller, séparées l'une de l'autre par un nœud *b* au milieu de la corde (2).

J'entoure maintenant le tube au point *b*, *ab* étant le tiers de sa longueur à partir de son extrémité inférieure *a*, et pinçant la portion *ba* en son milieu, je l'écarte et la lâche. Aussitôt la longueur *bc*, au-dessus de la main, se partage en deux segments vibrants, et, quand on retire la main, le tube entier se divise en trois segments ou ventres, séparés les uns des autres par deux nœuds sans mouvement b, b' (4); on passe ensuite au point *b* (5) situé au quart de la longueur du tube; on l'entoure du pouce et de l'index; on pince le segment inférieur plus petit, et le tube entier se montre partagé en trois segments vibrants, séparés l'un de l'autre par trois nœuds b, b', b'' (6). On pourrait de la même manière partager le tube en cinq ventres et quatre nœuds.

Ce mode de division soudaine du long segment supérieur du tube, sans cause apparente, est vraiment surprenant; mais, en y réfléchissant, on reconnaît qu'au fond ces expériences sont entièrement semblables à celles qui ont mis en évidence la coalescence des ondulations directes et réfléchies. Revenant, en effet, pour un moment à nos premières expériences, nous reconnaîtrons que le mouvement de va-et-vient de la main, dont l'amplitude avait à peine 1 ou 2 centimètres, suffisait à faire parcourir aux points milieux des segments vibrants des distances de 12 à 18 centimètres.

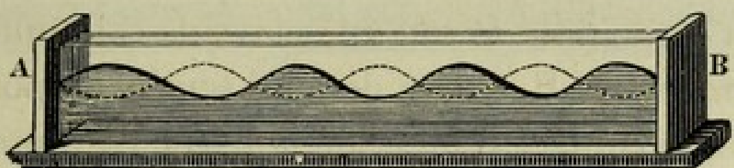
Rhythmées convenablement, les impulsions s'ajoutaient de telle sorte que l'amplitude des segments vibrants excédait immensément celle des doigts qui avaient déterminé le mouvement. En réalité, la main n'était qu'un point nodal ou un nœud, tant son mouvement était relativement petit. Dans la pratique, il est convenu et exact de considérer les extrémités du tube comme des nœuds.

Revenons maintenant au cas représenté par la figure 32 (1), où le tube étant entouré en son milieu *b*, le segment inférieur *ab* a reçu le mouvement d'oscillation correspondant à sa longueur et à sa tension. Le cercle formé avec le pouce et l'index permet au tube d'osciller en *b* avec une amplitude de plus de 1 centimètre, et les vibrations exécutées par ce point agissent sur la moitié supérieure *bc*, exactement comme les impulsions de la main, quand elles amenaient le tube suspendu au plafond à osciller dans son ensemble (*fig.* 28). Aux impulsions rhythmées de la main ont succédé les oscillations rhythmées de la moitié inférieure du tube; ces oscillations, quoique limitées dans leur excursion à l'endroit entouré du pouce et de l'index, vont s'accumulant assez pour produire une amplitude très-supérieure à la leur. Le même raisonnement s'applique aux autres cas de subdivision du tube. Si au lieu d'entourer un point du pouce et de l'index, pour pincer ensuite la portion du tube située au-dessous, on saisissait ce point avec la main pour lui communiquer les impulsions rhythmées qui conviennent au segment inférieur du tube, on obtiendrait exactement le même effet. Les deux phénomènes sont ainsi ramenés à une seule et même cause, la combinaison des ondulations directes et réfléchies.

Ajoutons que lorsqu'on partage ainsi le tube en nœuds et en ventres par les impulsions rhythmées de la main, aucun des nœuds n'est à proprement parler un point sans mouvement; car si ces nœuds ne pouvaient pas osciller sur une très-petite amplitude, le mouvement des divers segments du tube ne pourrait pas se maintenir.

Ce qui est vrai pour les ondes d'un tube en caoutchouc s'applique généralement à toutes les ondulations quelles qu'elles soient; les ondes de l'eau, par exemple, car les vagues obéissent aux mêmes lois, et reproduisent les mêmes phénomènes par la coalescence des ondes directes et réfléchies. Prenons ce vase long et étroit, avec des parois en verre, qui n'est que la reproduction du canal ondulatoire des frères Weber. Remplissons-le d'eau jusqu'au niveau AB (*fig.* 33).

Fig. 33.



En soulevant brusquement et laissant retomber l'extrémité A du vase, on engendre une onde qui va en B et s'y réfléchit. En envoyant ainsi successivement plusieurs ondes à des intervalles réguliers, on divise la surface en deux ondes stationnaires. On pourrait la diviser en trois, en quatre ou en un plus grand nombre d'oscillations (*voyez* la figure), en rendant plus rapide la succession des impulsions, et ces ondulations seraient toutes séparées les unes des autres par des nœuds. La marche d'un porteur d'eau est quelquefois tellement cadencée que l'eau de son seau se dispose en ondes stationnaires, dont la hauteur augmente assez pour que l'eau saute par dessus les bords. La pratique a révélé au porteur d'eau ce qu'il a à faire quand cet accident survient; il change son pas, altère la période de ses impulsions, et arrête ainsi l'accumulation du mouvement[1].

[1] Voyageant dernièrement sur un chemin de fer de France, je plaçai par hasard une bouteille à moitié pleine d'eau sur une des petites tablettes du coupé. Ses mouvements excitèrent ma curiosité : parfois le liquide était tout à fait tranquille ; parfois, au contraire, il oscillait violemment. Pour le voyageur assis dans le vagon il n'y avait dans

Revenons maintenant de ces oscillations mécaniques grossières, mais qui ne sont cependant pas sans intérêt, aux vibrations des cordes sonores. Voici un sonomètre (ou monocorde) avec son fil d'acier, que nous avons déjà fait résonner sur diverses longueurs. Dans nos premières expériences pour raccourcir le fil, nous avions recours à un chevalet mobile, contre lequel nous le pressions, de manière à enlever au point pressé toute possibilité de mouvement. Au fond, cette forte pression n'était pas nécessaire. En effet, posons légèrement sur le milieu de la corde l'extrémité d'une plume d'oie, et attaquons avec l'archet une de ses deux moitiés; la corde rend le son à l'octave de celui que rendrait sa longueur totale. Il a suffi de faire sentir, au point milieu de la corde, le contact si léger de la barbe de plume pour la forcer à se diviser en deux segments vibrants. Il n'est pas même nécessaire de laisser la plume en contact avec le fil pendant toute la durée de l'expérience; après qu'on a donné le coup d'archet, on peut éloigner la plume; la corde, en continuant de vibrer, rendra la même note que d'abord. Il arrive exactement ici ce qui arrivait quand nous touchions le milieu de notre tube tendu de caoutchouc, entouré du pouce et de l'index (*fig.* 32) (1). Ce n'était pas seulement la moitié pincée qui vibrait, la moitié supérieure vibrait de son côté synchroniquement. Nous pouvons reproduire avec la corde vibrante tous les effets que nous avons obtenus avec le tube. Et ce point est si important que nous ne devons pas né-

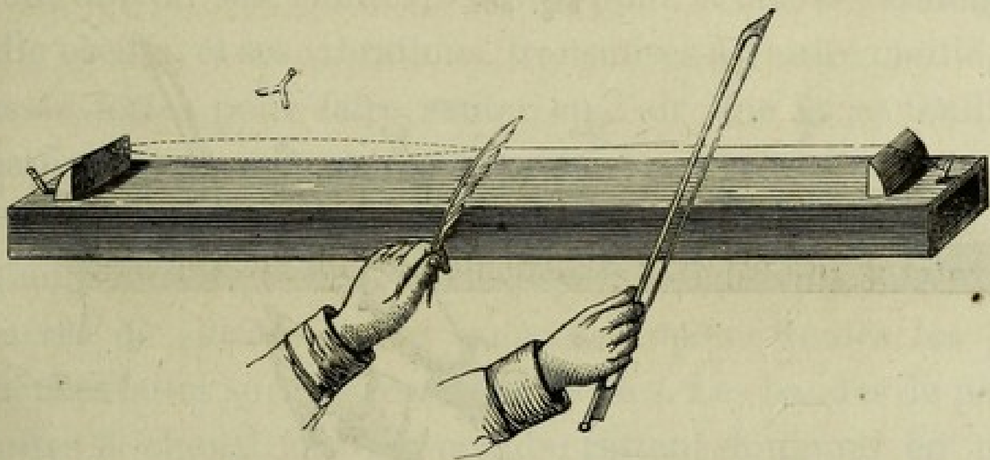
le mouvement aucune différence à laquelle on pût attribuer ce changement d'allure du liquide. Le fait était cependant que dans le premier cas les trépidations du véhicule ne contenaient aucune vibration synchrone avec la période d'oscillation de l'eau; tandis que dans le second cas le liquide accusait par ses mouvements la présence d'ondes sympathiques. Dans cet ensemble confus de vibrations, l'eau choisissait les composantes d'accord avec les siennes et révélait leur présence au voyageur qui n'avait nullement la conscience de leur apparition.

Dans une des leçons suivantes j'aurai l'occasion de parler des flammes dansantes qui, dans les wagons du chemin de fer métropolitain, répondent si bien aux vibrations synchroniques.

gliger de le bien faire ressortir par des expériences spéciales.

Pour prouver que si, après avoir amorti les vibrations au centre de la corde par un léger contact, on attaque avec l'archet une de ses moitiés, l'autre moitié vibrera synchroniquement, plaçons sur le milieu de la moitié non touchée un petit cavalier en papier rouge (*fig.* 34).

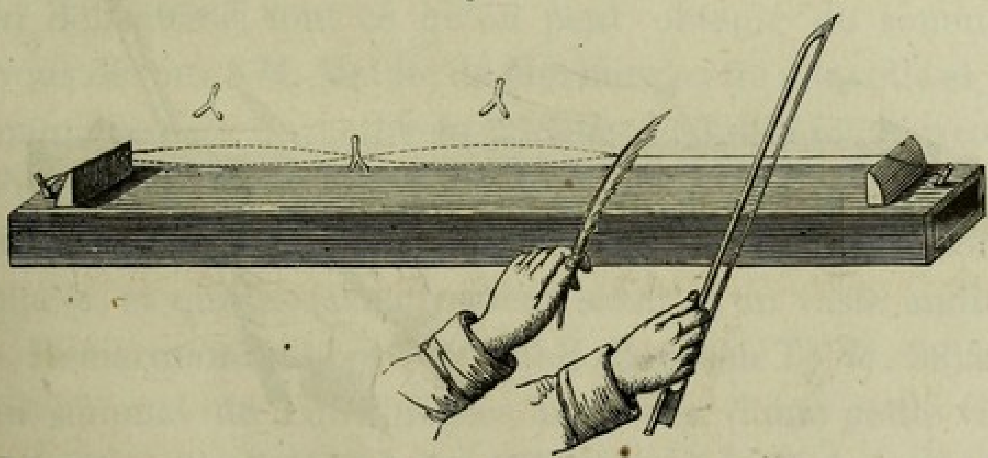
Fig. 34.



Touchons au milieu, et faisons glisser l'archet, la corde vibre et le cavalier saute en l'air.

Amortissons maintenant la corde au tiers de sa longueur et attaquons avec l'archet la section la plus courte. Elle ne vibrera pas seule; la plus grande section se divise d'elle-même en deux segments ou ventres, séparés par deux nœuds.

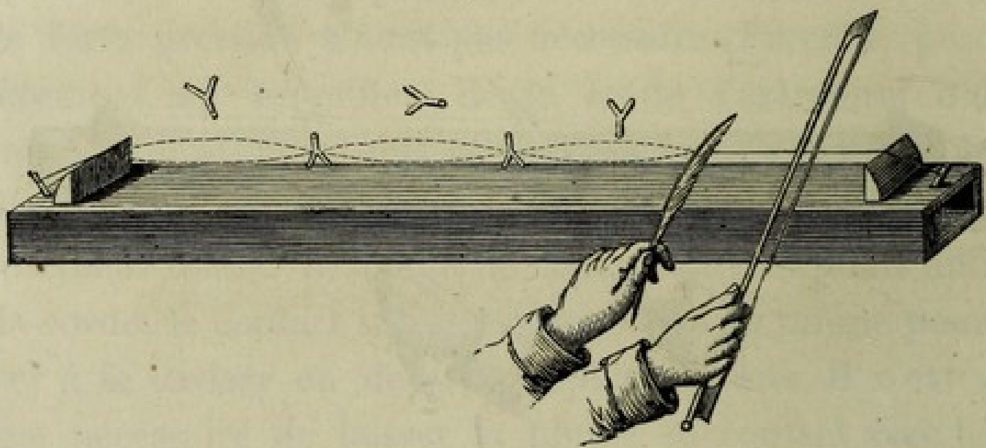
Fig. 35.



On le prouve en plaçant (*fig.* 35) sur les ventres des cavaliers rouges, sur le nœud un cavalier bleu. Aussitôt que l'archet attaque le tiers de la corde, les cavaliers rouges s'agitent et sont bientôt jetés à bas; tandis que le cavalier bleu, à cheval sur le nœud, reste immobile.

Touchons encore la corde au quart de sa longueur, et nous verrons qu'en l'attaquant avec l'archet sur le plus court segment, elle se partagera en trois ventres et deux nœuds. Nous le prouvons (*fig.* 36) en désarçonnant les trois cava-

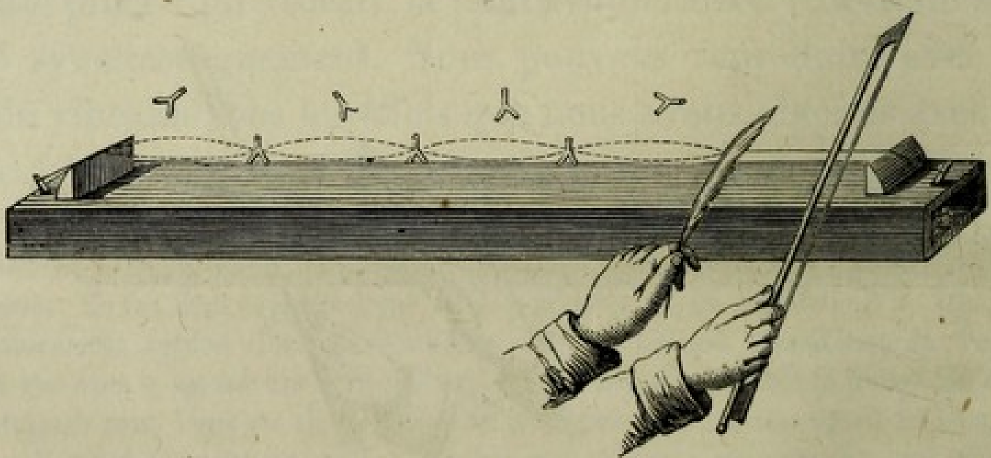
Fig. 36.



liers rouges à cheval sur les ventres, tandis que les cavaliers bleus des nœuds restent imperturbables.

Touchons enfin la corde au cinquième de sa longueur, et disposons, comme précédemment, quatre cavaliers rouges sur les ventres, trois cavaliers bleus sur les nœuds (*fig.* 37).

Fig. 37.



Au premier glissement de l'archet, les quatre cavaliers rouges sont désarçonnés et les trois cavaliers bleus restent en place. De cette manière, nous répétons avec la corde sonore la série d'expériences que nous avions déjà faites avec le tube tendu de caoutchouc.

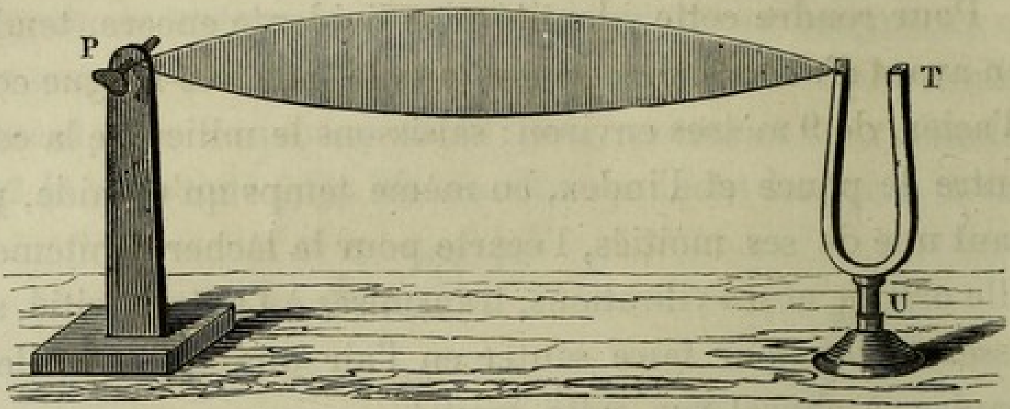
Pour rendre cette identité plus évidente encore, tendons en avant d'une table, à travers la salle, une très-longue corde d'acier, de 9 mètres environ; saisissons le milieu de la corde entre le pouce et l'index, en même temps qu'un aide, pinçant une de ses moitiés, l'écarte pour la lâcher subitement; elle oscille, et ses vibrations, transmises à l'autre moitié, sont assez fortes pour faire sauter en l'air une large feuille de papier, à cheval sur cette moitié.

Avec cette longue corde et des cavaliers, non plus de quelques millimètres carrés, mais de plusieurs décimètres carrés de surface, nous pouvons répéter toutes les expériences faites sur des cordes musicales. Les bandes de papier, mises à cheval sur les nœuds, restent toujours en place, tandis que celles installées sur les ventres sont lancées simultanément en l'air, dès que l'on fait vibrer le plus court segment. Dans ce cas, pour l'œil placé assez près, les oscillations du fil deviennent visibles.

Je ne puis manquer de vous intéresser vivement, en vous rendant témoin de quelques expériences faites plus récemment avec les cordes vibrantes, et qui surpassent en beauté, en délicatesse, tout ce qu'on peut obtenir du sonomètre. Nous devons à M. Melde, de Marburg, cette nouvelle et charmante manière de mettre en évidence les vibrations des cordes. J'exécuterai les expériences sur l'échelle et avec les modifications qui conviennent aux circonstances où nous sommes placés, et qui les fassent mieux saisir d'un vaste auditoire.

Remarquons d'abord ce grand diapason T (*fig.* 38) armé, au sommet de l'une de ses branches, d'une petite vis qui sert de point d'attache à un fil ou cordonnet de soie. Parti de l'extrémité du diapason, ce fil va aboutir à une cheville P, autour de laquelle il s'enroule, de sorte qu'en tournant la cheville on puisse lui donner la tension voulue. On attaque

Fig. 38.



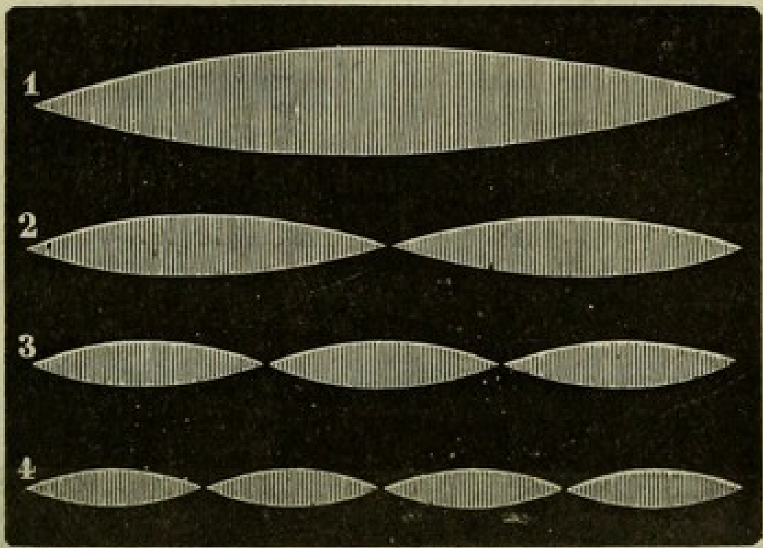
le diapason avec l'archet; il n'en résulte pour le fil qu'un frémissement irrégulier. Mais tendons-le de plus en plus, jusqu'à ce qu'enfin il s'épanouisse en un magnifique fuseau gazé, de plus de 15 centimètres dans sa plus grande largeur, et remarquable par son lustre perlé. La tension est alors telle que le fil est animé sur toute sa longueur d'un mouvement de va-et-vient, dont les oscillations se font dans un plan vertical.

Relâchons maintenant le fil, et dès que nous serons revenus à la tension convenable, il se divisera soudainement en deux segments ou ventres, séparés par un nœud très-nettement défini, et qui en apparence est complétement immobile.

Le diapason continuant toujours à vibrer, le fil, de plus en plus lâche ou détendu, se divise successivement en quatre, cinq, dix, vingt portions vibrantes, séparées l'une de l'autre par un nombre approprié de nœuds.

Lorsqu'on fait vibrer ainsi des cordons de soie blanche, leur beauté est extrême. Les nœuds apparaissent comme des points absolument fixes, tandis que les ventres s'étalent en fuseaux si délicats qu'on les dirait formés d'une gaze opalescente. En outre, chaque inégalité de surface de la soie tordue écrit son mouvement en traits plus ou moins lumineux sur la surface de cette gaze aérienne. Les quatres modes de vibrations que nous venons d'étudier sont représentés dans la figure 39, 1, 2, 3, 4.

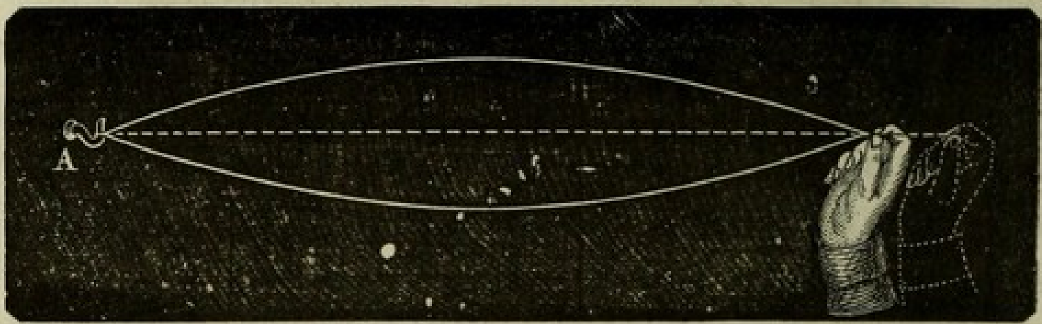
Fig. 39.



Lorsque le synchronisme est parfait, les protubérances ou reliefs sont bien accusés, bien fixes, et ils persistent longtemps. Mais un léger défaut de synchronisme les rend instables ; ils se montrent un instant et disparaissent aussitôt.

Avec la disposition de la figure 38, le diapason vibre dans la direction de la longueur de la corde. Chaque impulsion en avant de la branche du diapason fait naître une protubérance qui court jusqu'à l'extrémité fixe de la corde, et subit là une réflexion ; de sorte que ces impulsions *longitudinales*, convenablement rhythmées, engendrent une vibration *transversale*. Pour mieux faire ressortir ce fait, attachons (*fig.* 40) à un crochet A, fixé dans une muraille, un des bouts d'une chaîne ou d'une corde pesante ; prenons en main l'autre bout, et tendons la corde horizontalement. Si nous imprimons à la main un mouvement de va-et-vient dans la direction de la corde, elle vibre dans son ensemble sans divisions, et nous constatons que chaque fois que la corde est à la limite de ses oscillations, la main occupe la position la plus avancée ou la plus voisine de l'extrémité fixe. Si elle vibre dans un plan vertical, la main, pour pouvoir rhythmer convenablement ses impulsions, doit occuper sa position la plus avancée au moment où la corde atteint la limite supérieure de ses écarts, et aussi au moment où elle atteint sa limite inférieure, toujours dans le plan vertical. Avec un peu de réflexion, on reconnaît que pour satisfaire à ces exigences la main doit exécuter une vibration complète pendant que la corde exécute une demi-vibration ; en d'autres termes, que les vibrations de la main doivent être deux fois plus rapides que les vibrations de la corde.

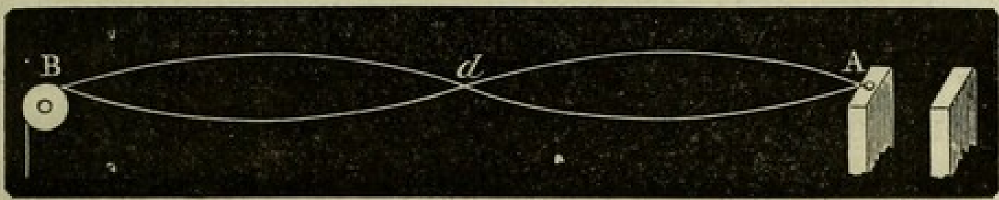
Fig. 40.



Il en est absolument de même de notre diapason. Lorsqu'il vibre dans le sens de la longueur de la corde, le nombre de ses vibrations complètes, dans un temps donné, est double du nombre des vibrations de la corde. Et si, tout étant ainsi arrangé, les vitesses du mouvement vibratoire du diapason et de la corde sont assez grandes pour produire une note musicale, la note du diapason sera à l'octave de la note de la corde.

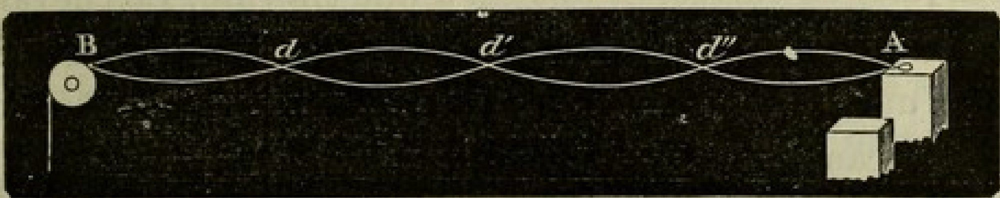
Mais si, au lieu d'imprimer à la main un mouvement de va-et-vient dans la direction de la corde pesante, nous la faisons mouvoir à angle droit avec cette direction, chaque impulsion en haut de la main coïncidera avec un mouvement en haut de la corde ; à chaque impulsion en bas de la main correspondra de même un mouvement en bas de la corde. Les vibrations de la main et de la corde seront dans ce cas parfaitement synchrones, et, si les mouvements de la main pouvaient faire naître un son musical, la corde rendrait ce même son. La même chose a lieu quand on substitue les vibrations du diapason à celles de la main. Il en résulte que si la corde vibre d'ensemble lorsque les vibrations du diapason ont lieu suivant sa longueur, elle se divisera en deux segments vibrants quand les vibrations du diapason lui seront perpendiculaires. Considérons, par exemple, une corde AB (*fig.* 41 et 42) passant sur une

Fig. 41.



poulie B, et tendue par un poids déterminé, omis dans la figure. Si le diapason vibre dans le sens de sa longueur, elle se partagera en deux segments égaux (*fig.* 41). Mais faisons tourner le diapason sur lui-même pour que ses vibrations soient à angle droit avec la direction de la corde, et aussitôt le nombre des ventres sera de quatre (*fig.* 42), ou double de

Fig. 42.



ce qu'il était dans le premier cas. Si nous attachons à un même diapason deux cordes de même longueur, l'une parallèle, l'autre perpendiculaire à la direction de ses vibrations, et si nous les tendons toutes deux par des poids égaux, quand le diapason viendra à vibrer, la seconde corde aura deux fois plus de ventres que la première.

On peut, avec les cordes vibrantes, produire un nombre infini d'effets très-agréables à l'œil. On peut d'abord, par la méthode du docteur Young, rendre visible la route parcourue par un quelconque de leurs points, en rendant ce point plus lumineux, et suivant du regard la ligne brillante qu'il décrit. On réussit très-bien en faisant usage d'un fil d'argent bruni, plat, tressé ou cordé, de manière à former une surface en hélice, d'où s'échappent, à des intervalles réguliers, des éclairs de lumière, quand il est éclairé comme il faut. Voici un de ces fils, attaché à un diapason convenablement choisi, et éclairé par la lumière électrique ; il vibre sous nos yeux, et ses éclairs lumineux décrivent des lignes droites dont l'éclat rivalise avec celui du soleil. Relâchons la corde, mais pas assez pour produire la subdivision d'ordre plus élevé. Au mouvement général de la corde se superpose une armée de mouvements plus petits, dont la combinaison engendre des réseaux d'une complication merveilleuse et d'une splendeur indescriptible [1].

En réfléchissant aux meilleurs moyens de rendre visibles à tout un vaste auditoire ces effets enchanteurs, j'ai songé à employer un fil de platine chauffé au rouge par un courant électrique. Le fil de platine part du diapason, passe sur un chevalet en cuivre, et aboutit à une cheville. Le chevalet de cuivre d'une part, et le diapason de l'autre, sont les deux pôles d'une pile voltaïque, dont le courant traverse le fil et le rend incandescent. J'attaque le diapason avec l'archet, le fil vibre sans division, ses deux extrémités brillent d'un éclat éblouissant ; mais son milieu est obscur, refroidi qu'il est par son passage rapide à travers l'air. L'incandescence va ainsi en diminuant graduellement des extrémités au milieu du fil. Je diminue la tension, et voici que le fil se partage en

[1] Je n'ai pas cherché à représenter ces curieux effets par des figures ; le passage rapide du réseau d'une forme à une autre plus belle encore ne peut pas être rendu par le dessin.

deux moitiés vibrantes ou ventres ; je le détends un peu plus, et il se forme trois ventres ; je le détends encore, et vous le voyez partagé en quatre ventres, séparés les uns des autres par trois nœuds brillants. A droite et à gauche de chaque nœud, l'incandescence va en diminuant jusqu'à s'éteindre. On remarque en outre que, quand le fil se partage en segments vibrants permanents, les nœuds brillent avec plus d'éclat que le fil avant son entrée en vibration. La raison de ce fait est que l'électricité passe plus librement à travers un fil froid qu'à travers un fil chaud. D'où il résulte que si les ventres sont refroidis par leur passage rapide à travers l'air, leur conductibilité devient plus grande ; il passe plus d'électricité dans le fil en vibration que dans le fil en repos, voilà pourquoi l'éclat des nœuds est accru. Si, avant d'exciter le diapason, on chauffe le fil jusqu'au rouge, la température du nœud, lorsqu'il entrera en vibration, pourra atteindre le point de fusion.

Voyons maintenant en quelques mots comment des expériences de M. Melde on peut déduire toutes les lois des cordes vibrantes. Voici quatre diapasons a, b, c, d, dont les nombres de vibrations sont entre eux comme les nombres 1, 2, 4, 8. Attachons une corde au plus grand, a, et tendons-la par un poids tel qu'elle vibre sans divisions. Puis, prenant toujours le même poids tendeur, déterminons les longueurs de cette même corde qui, attachées successivement aux trois autres diapasons, vibrent également comme un tout, ou sans divisions. Nous trouvons que ces quatre longueurs sont entre elles comme les nombres 8, 4, 2, 1.

De là résulte cette première loi, que nous avons déjà établie d'une autre manière :

La vitesse de vibration est inversement proportionnelle à la longueur de la corde.

Dans ce premier cas, la plus longue corde vibrait sans division quand elle était attachée au diapason a; attachons-la maintenant au diapason *b*, en la tendant toujours par le même poids; elle vibre quand le diapason vibre. Mais comment vibre-t-elle? En se divisant en deux ventres ou segments égaux. C'est seulement ainsi qu'elle s'accommode aux vibrations plus rapides de *b*. Attachée à *c*, la même corde se divise en quatre segments vibrants; elle se divise en huit, quand on l'attache à *d*. Le nombre des segments ou ventres est proportionnel à la rapidité des vibrations. Il est évident que nous avons ici, sous une forme plus précise, un résultat de nos expériences précédentes sur le tube de caoutchouc mis en mouvement par la main. Il est clair aussi que ce résultat pourrait se conclure théoriquement de notre première loi.

Étendons encore cette expérience. Voici deux diapasons dont les sons sont séparés par l'intervalle musical qu'on appelle une *quinte*. Attachons une corde à l'un d'eux, et tendons-la au degré convenable pour qu'elle se divise en deux segments ou ventres; attachée à l'autre diapason, et tendue par le même poids, elle se divise instantanément en trois segments vibrants. Or, pour former l'intervalle d'une quinte, les vibrations de l'un des diapasons doivent être à celles de l'autre dans le rapport de 2 : 3. Les divisions successives de la corde déclarent donc que cet intervalle existe réellement.

Voici maintenant deux diapasons séparés par l'intervalle d'une quarte. Avec une certaine tension, un des diapasons divise notre corde en trois segments; l'autre, avec la même tension, la partage en quatre, et ces nombres expriment bien le rapport de leurs nombres de vibrations. On pourrait rendre sensible au regard de la même manière les divisions de la corde dans ses rapports avec les autres intervalles musicaux[1].

Passons à une autre loi. Prenons ces deux diapasons *a* et *b*, dont le premier vibre deux fois plus vite que le second. Atta-

[1] Les intervalles musicaux seront l'objet spécial d'une Leçon ultérieure.

chons le cordon de soie à a, et tendons ce cordon jusqu'à ce que, synchrone avec le diapason, il vibre sans division. Prenons un second cordon de même longueur, mais formé par la réunion en juxtaposition de quatre cordons semblables au précédent. Attachons le cordon composé à b, puis, conservant la tension du cordon simple, faisons vibrer b. Le cordon composé vibre synchroniquement avec b, et sans division. Donc, puisque le diapason b vibre avec la moitié de la vitesse de a, en quadruplant le poids du cordon, nous avons réduit de moitié sa vitesse de vibration. On prouverait aussi simplement qu'en rendant le cordon neuf fois plus pesant, on réduirait au tiers sa vitesse de vibration, etc. Ainsi se trouve démontrée cette seconde loi :

La vitesse de vibration est inversement proportionnelle à la racine carrée du poids de la corde.

En opérant comme nous allons le dire, on démontre ce même résultat d'une manière très-élégante. Une corde de soie, longue de 24 décimètres, est attachée à un diapason. Sur 8 décimètres, cette corde est formée de la réunion sans torsion de quatre fils simples ; sur les 16 décimètres restants, elle est formée d'un seul fil. Tendons-la de telle sorte qu'elle se divise en deux segments vibrants. Où se fera le partage? Ce ne sera pas au milieu, comme dans le cas d'une épaisseur uniforme, mais au point où se termine la portion épaisse du cordon. Ce segment épais, long de 8 décimètres, vibre maintenant à l'unisson du segment mince, long de 16 décimètres ; et ce résultat est une conséquence directe des deux lois ci-dessus établies. Il est à peine nécessaire d'ajouter que, si les longueurs étaient dans un autre rapport que celui de 1 : 2, le nœud ne se formerait plus au point de jonction des deux portions épaisse et mince du cordon.

Voici encore deux cordes de même longueur et de même épaisseur. Une d'elles est attachée au diapason a, et l'autre au diapason *b*, d'une vitesse double de vibrations. Tendue par un poids de 20 grammes, la corde attachée à *a* vibre sans division; et, si nous substituons le diapason *b* au diapason *a*, il faut un poids de 80 grammes pour qu'elle continue à vibrer sans division. Donc, pour doubler la vitesse de vibration, il faut quadrupler le poids tendeur. On trouverait pareillement que, pour tripler cette vitesse, il faut rendre la tension neuf fois plus forte, etc. De là cette troisième loi :

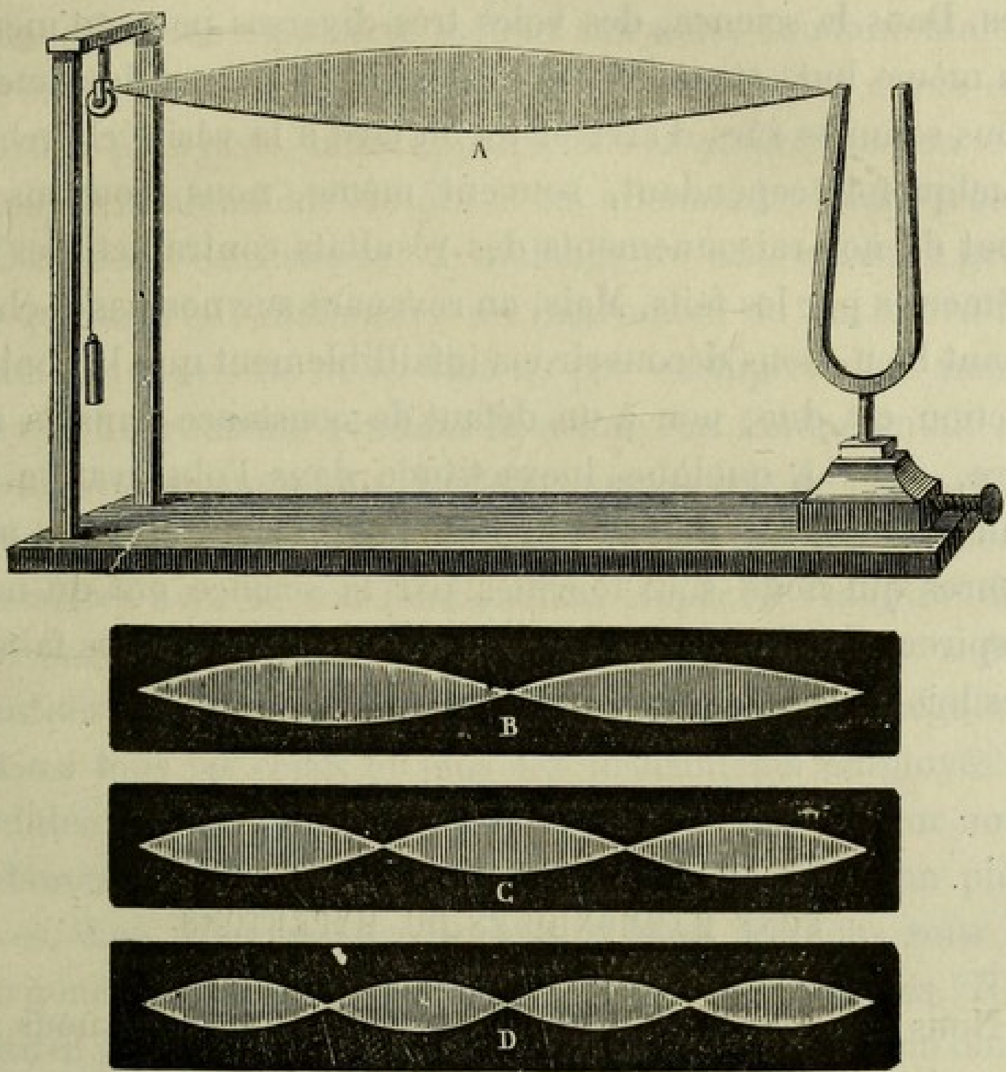
La vitesse de vibration est proportionnelle à la racine carrée de la tension.

Varions cette expérience. Faisons passer sur la poulie ce cordon de soie fixé au diapason, et tendons-le par un poids de 80 grammes. Il vibre sans division comme l'indique la figure 43. Diminuons le poids, et détendons le fil jusqu'à ce qu'il se divise en deux segments égaux, comme en B. Qu'est alors le poids tendeur ? 20 grammes, ou le quart du premier. Avec un poids sensiblement égal à 9 grammes, le fil se diviserait en trois segments, comme en C ; un poids de 5 grammes le partagerait en quatre segments, comme en D. Ainsi donc, une tension d'un quart a doublé, une tension d'un neuvième a triplé, une tension d'un seizième a quadruplé le nombre des segments ou ventres. Plus généralement, le nombre des segments est inversement proportionnel à la racine carrée de la tension. Ce résultat se déduit par le raisonnement de la première et de la troisième loi; l'expérience a mis en évidence son exactitude.

Prenons enfin trois fils de même longueur, de même épaisseur, mais de densités très-différentes. Le premier est formé d'un métal léger, l'aluminium; le second, d'argent; le troisième, d'un métal lourd, le platine. Attachons-les successivement à un même diapason, et déterminons les poids nécessaires pour les faire vibrer sans division, ou les faire se partager en un même nombre quelconque de segments.

Nous trouverons que les poids spécifiques ou densités des trois fils sont directement proportionnels aux poids ten-

Fig. 43.



deurs. Mais nous avons déjà établi que, toutes choses égales d'ailleurs, les vitesses de vibration des fils sont inversement proportionnelles aux racines carrées des poids qui les tendent. Nous arrivons donc à cette quatrième loi :

La vitesse de vibration de différents fils de même longueur et de même épaisseur est inversement proportionnelle aux racines carrées de leurs densités.

Il est évident que, par le moyen du diapason, nous pourrions déterminer les poids spécifiques de tous les métaux susceptibles d'être étirés en fils d'une ténacité ou d'une finesse suffisantes.

Nous sommes donc arrivés, par des considérations et des expériences entièrement différentes de celles que nous avions mises en jeu d'abord, à ces mêmes lois des vibrations des cordes. Dans la science, des voies très-diverses peuvent mener au même but, et, pourvu que nous les suivions fidèlement, nous sommes sûrs d'arriver tôt ou tard à la vérité cherchée. Quelquefois cependant, souvent même, nous trouvons au bout de nos raisonnements des résultats contradictoires ou démentis par les faits. Mais, en revenant sur nos pas et cherchant bien, nous découvrirons infailliblement que la contradiction est due, non à un défaut de constance dans la nature, mais à quelque inexactitude dans l'observation ou dans nos raisonnements. Les millions d'expériences de tous genres qui nous sont fournies par la science ont dû nous inspirer une confiance absolue dans la stabilité des faits et des lois de la nature.

SONS HARMONIQUES OU HYPERTONS.

Nous arrivons à une partie de notre sujet dont nous reconnaîtrons de plus en plus la haute importance. Nous avons démontré par les expériences les plus variées qu'une corde tendue peut soit vibrer *comme un tout*, sur toute sa longueur et sans division, soit se partager en un certain nombre de segments égaux dont chacun vibre comme une corde indépendante. Mais, en réalité, il n'est pas possible que la corde vibre dans son ensemble sans se subdiviser d'elle-même plus ou moins, c'est-à-dire qu'aux vibrations de la corde entière se superposent toujours, dans un degré plus ou moins marqué, les vibrations de ses parties aliquotes. Les notes plus élevées produites par ces dernières vibrations ont été nommées les *sons harmoniques* de la corde. Il en est de même généralement avec toute autre sorte de corps sonores. Partout et toujours, il y a coexistence de vibrations. Des notes plus élevées se mêlent aux notes fondamentales, et c'est ce mélange qui détermine ce qu'à défaut d'une expression plus juste, nous appellerions la *qualité* du son : les Français la nomment *timbre* et les allemands *klangfarbe*[1].

C'est cette coexistence, ce mélange de sons aigus et graves qui nous fait distinguer un instrument de musique d'un autre : la clarinette et le violon, par exemple, alors même que ces instruments rendent le même son fondamental, ne sauraient être confondus. Les sons accessoires de l'une sont différents des sons accessoires de l'autre, et l'union de ces sons accessoires avec le son fondamental empêche l'identité des deux sons ; c'est le cas de quantités inégales ajoutées à des quantités égales, les sommes sont nécessairement inégales.

Ainsi tous les corps et tous les instruments employés à produire des sons musicaux émettent, en outre de leur note fondamentale, des sons dus à des ordres de vibration plus élevés. Les Allemands comprennent tous ces sons sous le nom générique de *obertones* (*sons supérieurs*, *hypertons*.) N'y aurait-il pas avantage à faire passer cette dénomination dans la langue anglaise? Qui n'a souvent envié la facilité avec laquelle la langue allemande se prête par la formation des mots composés à l'expression de toutes les idées? Le terme *klangfarbe* (*couleur du son*), par exemple, employé par M. Helmholtz, est singulièrement expressif, et il est à désirer que la langue anglaise ait son équivalent. Nous savons que la couleur dépend de la vitesse de vibration du milieu qui propage la lumière ou de l'éther, et que la lumière bleue est à la lumière rouge ce qu'un son plus aigu est à un

[1] « La qualité du son se nomme quelquefois : son registre, sa couleur, ou son timbre. » Th. Young.

son plus grave. Une couleur simple n'a qu'une seule vitesse de vibration, et nous devons la considérer comme l'analogue d'un ton simple en musique. Un *ton optique* peut se définir la couleur simple résultant d'un mode de vibration qui ne peut pas être décomposé en vibrations plus simples. Une couleur composée, au contraire, résulte du mélange de deux ou plusieurs couleurs simples ou tons; et un assemblage de tons tel que celui qui résulte de la résonnance simultanée du son fondamental et des sons harmoniques d'une corde est ce que les Allemands nomme *klang* (son pris dans l'ensemble de toutes les vibrations qui le composent). Ne pourrait-on pas employer le mot anglais *clang* pour exprimer la même chose, en donnant à ce mot une signification scientifique précise, en dehors de la signification populaire, et ajouter le mot *colour* or *tint* (*teinte*) pour particulariser le caractère du *clang*, en faisant du mot composé *clang-tint* l'équivalent de *klangfarbe*[1] ?

Nous avons maintenant à étudier plus attentivement que nous ne l'avons fait jusqu'ici les subdivisions des cordes en segments harmoniques. Reprenons notre sonomètre avec son fil métallique tendu par un poids. L'échelle de l'instrument est divisée en 100 parties égales, et la division 50 répond au milieu du fil. De même les divisions 33, 25, 20 répondent à peu près exactement au tiers, au quart, au cinquième, pris à partir du zéro ou de l'extrémité de l'échelle. Ces nombres suffisent au but que nous voulons atteindre. Pinçons la corde à 50, vous entendez le timbre du son rendu; il semble creux et sourd. Pinçons à 33, le timbre est différent. Pinçons à 25, c'est encore un tout autre timbre différent du premier et du second. A mesure que l'on s'éloigne du milieu de la corde,

[1] Nous conservons les dénominations françaises : *son* (klang); *timbre* (klang-farbe); *sons harmoniques* (obertones); mais il faut se rappeler qu'*harmonique* n'entraîne pas *accord*. Les sons harmoniques font quelquefois dissonance. *(Note du traducteur.)*

le timbre devient plus brillant, le son est plus clair et plus perçant. Quelle peut donc être la raison de ces différences de son dans un même fil ?

Le célèbre Thomas Young, professeur autrefois à l'Institution royale, nous a mis en mesure de résoudre cette question. Il a prouvé que lorsqu'une corde est pincée en un quelconque de ses points, il ne peut se produire aucun des sons harmoniques pour lesquels ce point devrait être un nœud. Démontrons-le expérimentalement.

Pinçons au point 50 et laissons la corde résonner librement. Il s'agit de constater l'absence du premier harmonique, de celui qui correspond à la division de la corde en deux segments ou ventres. S'il était présent, en touchant ou amortissant la corde au point 50, nous ne le ferions pas disparaître, car ce point est pour lui un nœud. Or, dès qu'on touche au point 50, le son fondamental s'en est allé et nous n'entendons pas son octave. Avec l'octave disparaît toute la progéniture des sons harmoniques dont les nombres de vibrations sont quatre fois, six fois, huit fois,... $2n$ fois (n étant un nombre quelconque) le nombre de vibrations du ton fondamental ; tous ces sons exigent au milieu un nœud qui, d'après la théorie de Young, ne peut pas exister.

Maintenant pinçons la corde à 25, et touchons à 50 comme précédemment. Ici le ton fondamental s'évanouit, mais son octave résonne claire et pleine à nos oreilles. En effet, le point 50 n'étant plus celui qu'on pince, il peut s'y former un nœud : le nœud s'est formé réellement, et les deux moitiés de la corde continuent à vibrer, alors que les vibrations de la corde entière ou oscillant dans son ensemble ont disparu.

Pinçons de même au point 33, et soyons sûr que le second harmonique ne fera pas partie du son rendu. On le prouve en amortissant le point 33. Si le second harmonique existait, il ne serait nullement affecté par le contact, car le point 33 est un de ses nœuds. Or nous n'entendons aucun son correspondant à une division de la corde en trois segments vibrants. Ce son n'est pas entendu parce qu'il n'existe pas. Tous les autres sons harmoniques dépendant de la division par 3, dont les nombres de vibrations seraient six, neuf, douze fois les nombre de vibrations du son fondamental, seront absents par la même raison.

Pinçons au nombre 20 et amortissons 33. Le contact, dans ce nouveau cas, n'éteint pas le second harmonique, qui continue à résonner clairement et pleinement après l'extinction du son fondamental. En même temps, le point 33 n'étant pas celui qui est pincé, il peut s'y former un nœud, et la corde par conséquent peut se diviser en trois parties. De la même manière, si l'on pince 25, puis qu'on l'amortisse, le troisième harmonique ne se fait pas entendre; mais si l'on pince en un point situé entre 25 et l'extrémité de la corde, le troisième harmonique résonne fortement. Nous pourrions continuer ainsi indéfiniment, et nous verrions toujours se vérifier la loi de Young, qui consiste en ce que, si l'on pince une corde en un quelconque de ses points, qu'on la frappe, ou, ajoute M. Helmholtz, qu'on l'excite par un archet, le son harmonique qui exige un nœud en ce point disparaît de l'ensemble général des sons de la corde.

Ces expériences font comprendre la grande influence que les vibrations d'ordre supérieur, ou les sons harmoniques, exercent sur la qualité du son rendu par une corde. Les tons plus élevés, qui deviennent si clairs et si pleins après l'extinction de la note fondamentale, se mêlaient et se fondaient en quelque sorte avec elle pendant qu'elle résonnait. Il peut sembler étrange que des sons aussi énergiques quand ils sont seuls soient tellement effacés par le son fondamental que même l'oreille exercée d'un musicien soit impuissante à les séparer les uns des autres. Mais M. Helmholtz a montré très-clairement que cette impuissance tient à un défaut de pratique et d'attention. Les facultés des musiciens ne se sont jamais exercées dans cette direction. Il est de nombreux effets de sons qu'ils distinguent sans peine, parce que leur art exige qu'ils s'habituent à les saisir. Mais ils n'ont pas senti la nécessité de savoir décomposerle timbre d'un instrument dans ses sons constituants. Cependant, en y faisant attention, l'oreille, même sans être aidée, arrive à faire cette analyse, surtout quand l'esprit sait d'avance ce que l'oreille doit se prêter à entendre.

Ceci me rappelle une circonstance intéressante de mes premières relations avec Faraday. Je voulais lui montrer, dans cette salle même, l'action exercée par l'électro-aimant sur un cristal. J'avais tout préparé ; mais, au moment où j'allais rendre l'électro-aimant actif, il metsa main sur monépaule, et me dit : « Que dois-je regarder et voir? » Dans l'ensemble des impressions que doit faire naître une expérience, ce prince des expérimentateurs lui-même sentait qu'il y a grand avantage à ce que l'attention soit dirigée sur le point spécial en question. Ce secours est surtout nécessaire lorsqu'il s'agit d'un phénomène aussi complexe, aussi intimement mêlé que les sons composants de ce que nous appelons le timbre. Un des moyens d'aider notre attention quand il s'agit d'isoler un son particulier est de le faire résonner faiblement sur une corde dont il soit le son fondamental. L'oreille, ainsi familiarisée, passe facilement du son isolé au son de même ton fondu dans un son composé, et le détache mieux de ses compagnons. Dans les expériences que nous avons faites il n'y a qu'un instant, et où notre but, dans chaque cas particulier, était de donner toute sa puissance au ton le plus élevé de la corde, nous faisions disparaître complétement le son fondamental. Mais nous pouvons l'affaiblir sans le détruire. Pinçons notre corde à 33, et touchons-la légèrement pendant un instant avec la barbe de plume au point 50. Nous affaiblissons assez le son fondamental par ce léger contact pour que son octave se fasse entendre distinctement. Touchons une seconde fois à 50, le son fondamental devient encore plus faible, de telle sorte que le premier harmonique l'emporte. Vous entendez à la fois les deux sons, et vous les auriez entendus tout d'abord si vous y aviez prêté une attention suffisante.

L'intensité des sons harmoniques d'une corde peut être augmentée ou affaiblie dans des limites fort étendues. Ils peuvent, ainsi que nous l'avons vu, être effacés par le ton fondamental, qu'ils peuvent effacer à leur tour. Le choc avec un corps dur est favorable, le choc avec un corps mou est défavorable à leur développement. Ils dépendent plus encore de la promptitude avec laquelle le corps choquant bat en retraite après avoir frappé la corde. Le poids et l'élasticité des marteaux du piano exercent sur eux une influence très-appréciable. Ils dépendent enfin du point où la corde est frappée. Si, par exemple, le choc a lieu au milieu, les harmoniques sont moins développées que quand le choc se fait près de l'extrémité. Les fabricants de pianos ont trouvé que le son est le plus agréable lorsque le point sur lequel frappe le marteau est distant de l'extrémité de la corde du 7^{me} ou du 9^{me} de sa longueur. M. Helmholtz, qui est à la fois mathématicien et physicien éminent, a calculé théoriquement l'intensité des harmoniques développés de diverses manières ; c'est-à-dire la force vive ou l'énergie de la vibration, indépendamment de ses effets sur l'oreille. Un seul des exemples cités par lui suffit à donner une idée des résultats auxquels il est parvenu. Le nombre 100 représentant dans chaque cas l'intensité du son fondamental ; celle du second harmonique, lorsque la corde est simplement pincée à un septième de l'une de ses extrémités, est égale à 56,1, un peu plus de la moitié. Lorsque la corde est frappée par le marteau du piano, et que la durée du choc est au moins des trois septièmes de la durée d'une période de vibration du son fondamental, l'intensité de ce même son harmonique n'est plus que 9 ; il se trouve ainsi presque entièrement effacé. Mais, lorsque la durée du contact est réduite à trois vingtièmes de la période du son fondamental, l'intensité de l'harmonique s'élève à 357. Enfin, si la corde est frappée vivement par un marteau très-dur, l'intensité de l'harmonique atteint 505, ou plus du quintuple de celle du son fondamental[1].

Pourquoi les constructeurs de pianos frappent-ils les cordes médianes de leurs instruments à une distance des extrémités égale au septième ou au neuvième de la longueur totale ? Leur seule raison pour agir ainsi est que, frappées en ces points, les cordes rendent des sons plus agréables. Cette pratique est en effet conforme à la théorie. Jusqu'aux notes qui exigent que ces points soient des nœuds, les sons harmoniques font accord avec le ton fondamental, comme M. Helmholtz l'a démontré. Mais les sixième et huitième sons harmoniques de la corde ne sont plus d'accord ; ils font au contraire dissonance, et il est important de s'en débarrasser. L'on y parvient en faisant du point qui doit être un nœud le point frappé par le marteau. Le ton qu'il s'agit d'écarter n'existe plus, et l'on n'a plus à redouter son effet désagréable.

Les sons mélodieux de la harpe éolienne sont produits par le partage en un nombre plus ou moins grand d'harmoniques des cordes tendues convenablement sur le passage d'un courant d'air. L'instrument est ordinairement adapté à une fenêtre entre le châssis et les montants, de telle sorte que l'air du dehors ne puisse pénétrer dans la chambre qu'en passant sur les cordes. M. Wheatstone recommande à ceux qui veulent produire ces sons dans de bonnes condi-

[1] *Lehre von den Tonempfindungen*, p. 135.

tions de tendre une corde de violon sous le bord inférieur d'une porte qui joint mal. Lorsque la porte est fermée, le courant d'air, entrant par en bas, fait vibrer la corde; et, s'il y a du feu dans la cheminée, les vibrations deviennent si intenses qu'il en résulte une grande variété de sons produits simultanément[1].

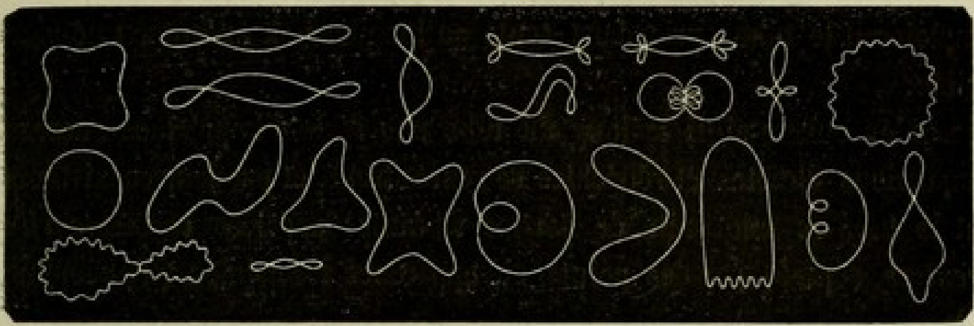
Un amateur de Bâle se flattait d'avoir construit avec des fils de fer un grand instrument appelé par lui la *harpe du temps* ou *harpe géante*, qui résonnait, disait-il, quand le temps venait à changer, et sous certaines conditions ou évocations du magnétisme terrestre. Chladni fit justice de ces prétentions, en démontrant que les sons de l'instrument n'avaient d'autre cause que l'action du vent sur les cordes.

Enfin, relativement aux vibrations des cordes métalliques, nous ne devons pas passer sous silence les expériences du docteur Young, qui fit servir, le premier, la lumière à l'analyse des sons. Il faisait tomber un rayon solaire sur une corde de piano, et obtenait ainsi un point lumineux très-brillant. Quand la corde venait à vibrer, ce point décrivait une ligne lumineuse semblable à celle que fait naître dans l'air la rotation rapide d'un charbon ardent, et la forme de cette ligne de lumière lui révélait les caractères du mouvement vibratoire de la corde. Ces expériences prouvèrent que les oscillations de la corde ne s'exécutaient pas dans un seul et même plan, qu'elle décrivait au contraire en vibrant des courbes plus ou moins complexes. Des vibrations partielles, superposées à celles de la corde entière, se révélaient sous forme de courbes fermées ou boucles lumineuses. La figure 44 représente quelques-unes des formes observées par

[1] L'action d'une corde dans ces conditions est substantiellement celle de la sirène. La corde rend le courant d'air intermittent. On peut aussi comparer son effet à celui d'une anche d'orgue. (Voy. Leçon V.)

le Dr Young. Chacune de ces figures correspond à une action distincte exercée par le fil sur l'air environnant. La forme de

Fig. 44.



l'onde sonore est modifiée par ces vibrations superposées, qui exercent par conséquent une influence sensible sur la qualité ou le timbre du son.

RÉSUMÉ DE LA LEÇON III.

La quantité de mouvement communiquée à l'air par une corde vibrante est trop faible en elle-même pour produire un son perceptible, même à une petite distance de la corde.

Aussi, les cordes employées comme sources de sons musicaux doivent-elles être associées à de très-larges surfaces qui emmagasinent leurs vibrations et les transmettent à l'air environnant.

C'est ainsi que les sons musicaux d'une harpe, d'un piano, d'une guitare ou d'un violon dépendent principalement de la table d'harmonie de l'instrument.

Les quatre lois suivantes régissent les vibrations des cordes : — La vitesse de vibration est inversement proportionnelle à la longueur ; elle est inversement proportionnelle au diamètre ; elle est directement proportionnelle à la racine carrée du poids tendeur ou de la tension ; elle est inversement proportionnelle à la racine carrée de la densité de la corde.

Si l'on compare des cordes qui diffèrent par leurs diamètres et leurs densités, la loi est que la vitesse de vibration est inversement proportionnelle à la racine carrée du poids de la corde.

Lorsqu'une chaîne tendue, ou un tube de caoutchouc rempli de sable et suspendu par un de ses bouts à un point fixe, reçoit une secousse à l'autre bout, la protubérance qui se forme à ce second bout court le long de la corde sous forme de pulsation, va jusqu'à l'extrémité fixe, où elle est réfléchie, et revient à la main qui a produit la secousse.

Le temps employé par l'impulsion à faire ce double trajet est le temps qu'emploierait le tube, pris dans toute sa longueur, à exécuter une vibration complète.

Lorsqu'on envoie ainsi le long du tube une série d'impulsions successives, les impulsions directes et réfléchies se rencontrent, et par leur coexistence divisent le tube en une suite de parties vibrantes appelées *segments vibrants* ou *ventres*, séparés par des points en apparence immobiles, qu'on nomme des *nœuds*.

Le nombre des segments ou ventres est directement proportionnel à la vitesse d'oscillation à l'extrémité libre du tube.

La main qui communique ces impulsions peut ne se déplacer que de un ou deux centimètres; et cependant, par l'accumulation des impulsions, l'amplitude des oscillations des segments vibrants ou ventres peut être quinze, vingt ou trente fois plus considérable.

Lorsqu'un tube de caoutchouc est fixé par ses deux extrémités et qu'on l'entoure à son centre d'un cercle formé avec l'index et le pouce, si l'on tire à soi une de ses moitiés et qu'on l'abandonne ensuite, les deux moitiés entreront en vibration. Si le cercle de l'index et du pouce entoure le tube à une distance de l'un de ses bouts égale au tiers, au quart ou au cinquième de sa longueur totale, et qu'on écarte, pour le lâcher aussitôt, le segment le plus court, le segment le plus long se subdivisera de lui-même en deux, trois ou quatre portions vibrantes, séparées par des nœuds.

Le nombre des segments vibrants ou ventres dépend de la vitesse de vibration au point entouré par l'index et le pouce.

Ici encore l'amplitude de vibration au point entouré peut être très-petite, par exemple, d'un centimètre; tandis que celle des segments peut être relativement grande, de plusieurs centimètres.

Une corde musicale, amortie par le contact léger des barbes d'une plume, en un point situé à une distance de l'une de ses extrémités égale à la moitié, au tiers, au quart, au cinquième, etc., de sa longueur, et dont on met en mouvement le plus petit segment, se divise exactement comme le tube de caoutchouc. On rend ces divisions visibles en y posant de petits cavaliers en papier; les cavaliers placés sur les ventres sont jetés à bas; les cavaliers qui sont placés sur les nœuds restent immobiles.

Les notes correspondantes à la division d'une corde dans ses parties aliquotes sont appelées les sons *harmoniques* de la corde.

Lorsqu'une corde vibre d'ensemble ou dans toute sa longueur, elle se divise néanmoins le plus souvent dans ses parties aliquotes. Les petites vibrations se superposent aux grandes, et les sons correspondants à ces petites vibrations, ceux que nous sommes convenus de nommer *tons supérieurs, hypertons*, ou *sons harmoniques,* se mélangent avec le son fondamental de la corde.

L'addition des sons harmoniques au son fondamental détermine la *qualité* du son, ce qu'on appelle en allemand *klang-farbe*, en anglais *clang-tint*, en français, *timbre*.

C'est l'addition des sons harmoniques à un même son fondamental qui nous fait distinguer le son d'une clarinette de celui d'une flûte, le son d'un violon de celui de la clarinette et de la flûte, etc. Si les tons fondamentaux de ces instruments étaient isolés, sans mélange aucun de sons harmoniques, nous ne pourrions plus les distinguer les uns des autres. Au contraire, par le mélange différent des sons harmoniques, les divers instruments prennent leur timbre particulier et se distinguent l'un de l'autre.

Dans les expériences précédentes, on peut remplacer le lourd tube de caoutchouc par un léger fil de soie, la main qui imprimait les vibrations par des diapasons, et faire ainsi que ce fil oscille comme un tout, ou se divise en un nombre quelconque de segments vibrants ou ventres. On produit ainsi des effets d'une grande beauté, et l'on démontre de nouveau les lois des cordes vibrantes.

Lorsqu'une corde tendue est pincée en un de ses points ou attaquée par un archet, aucun des sons harmoniques pour lesquels ce point serait un nœud ne peut se produire.

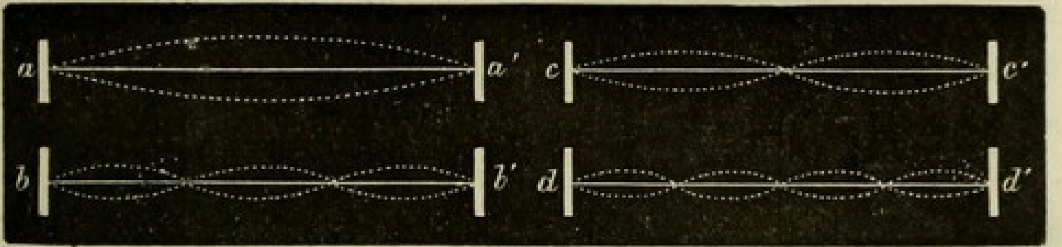
Le point frappé par le marteau d'un piano est à une distance de l'une de ses extrémités égale au septième ou au neuvième de la longueur de la corde ; il en résulte que les notes qui auraient ce point pour nœud ne peuvent se produire et qu'on écarte ainsi une source de dissonance.

LEÇON IV.

Vibrations d'une verge fixée par ses deux extrémités ; ses subdivisions et les sons harmoniques qui leur correspondent. — Vibrations d'une verge fixée par une seule de ses extrémités. — Kaléidophone. — Le violon de fer et la boîte de musique. — Vibrations d'une verge libre à ses deux extrémités. — Le Claquebois et l'Harmonica de verre. — Vibrations d'un diapason ; ses subdivisions et ses sons harmoniques. — Vibrations des plaques carrées. — Découvertes de Chladni. — Analyse des vibrations des plaques par M. Wheatstone. — Figures de Chladni. — Vibrations des disques et des cloches. — Expériences de Faraday et de Strehlke.

La troisième leçon a été consacrée aux vibrations transversales des cordes. Nous étudierons dans la quatrième les vibrations des verges, des plaques et des cloches, en commençant par le cas d'une verge fixée à ses deux extrémités. Ses modes de vibration sont exactement ceux d'une corde : elle peut ou vibrer tout entière ou se diviser d'elle-même en deux, trois, quatre, ou un plus grand nombre de segments vibrants. Mais, pour une raison que nous énoncerons tout d'abord, les lois qui règlent les tons ou nombres de vibrations des sons successifs changent complétement dans le passage des cordes aux verges. Ainsi, par exemple, lorsqu'une corde se divise en deux segments égaux, chacune des moitiés vibre avec une vitesse double de celle de la corde entière ; tandis que, dans ce même cas de la division en deux segments, les deux moitiés de la verge vibrent avec une vitesse presque triplée. Plus exactement, le rapport des deux nombres de vibrations de la verge totale et de sa moitié est 9 : 25 ; le rapport du carré de 3 au carré de 5. La figure 45 représente les quatre premiers modes de vibration d'une verge fixée par ses deux bouts : aa' est la verge vibrant dans toute sa longueur ; *cc'*, *bb'*, *dd'* représentent la verge divisée en deux, trois ou quatre segments. Les vitesses de vibration dans ces

Fig. 45.



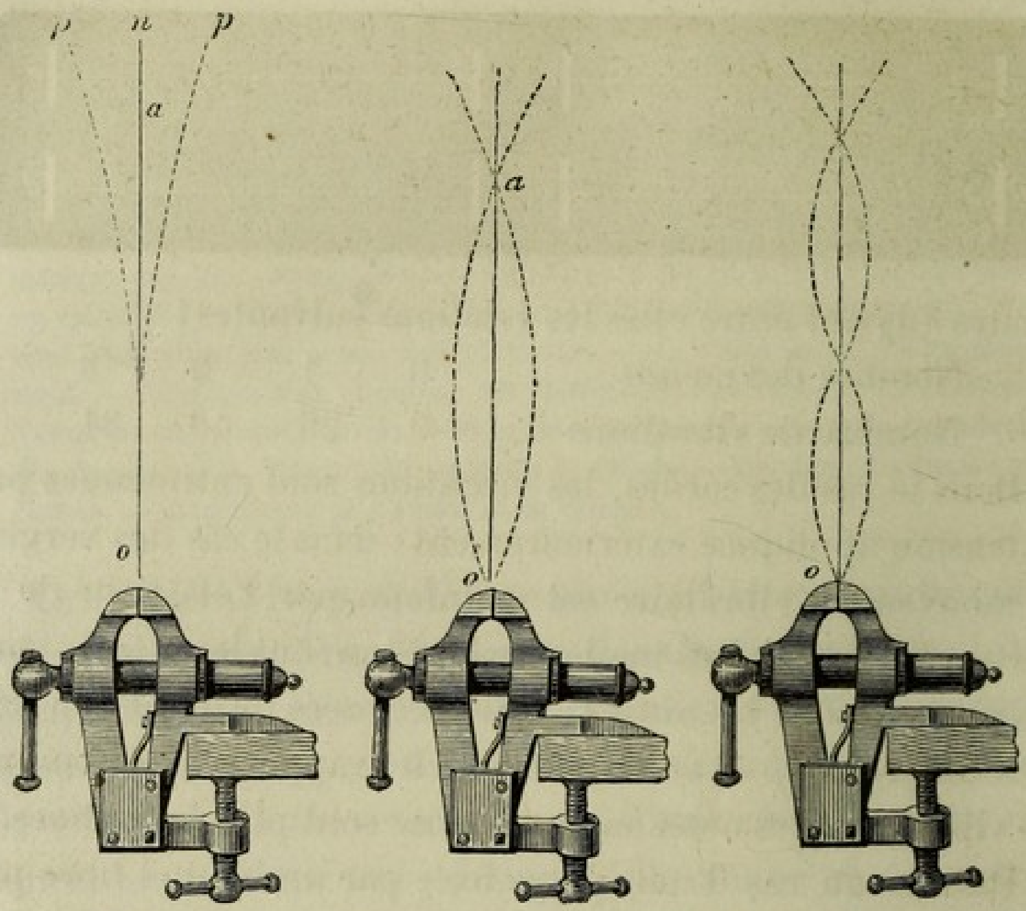
quatre cas ont entre elles les relations suivantes :

Nombre des nœuds. . . .	0	1	2	3
Nombre de vibrations . .	9	25	49	81

Dans le cas des cordes, les vibrations sont entretenues par la tension appliquée extérieurement ; dans le cas des verges, le mouvement vibratoire est maintenu par l'élasticité de la verge elle-même. Les modes de division sont les mêmes pour les unes et pour les autres ; mais les forces mises en jeu sont très-différentes, et voilà pourquoi les rapports des nombres de vibrations des notes successives ne sont plus les mêmes.

Passons au cas d'une verge fixée par un bout et libre par l'autre. Ici encore, c'est l'élasticité de la matière et non pas une tension extérieure qui maintient les vibrations. Pour aller comme toujours des vibrations mécaniques, plus grossières, aux vibrations sonores, plus délicates, fixons dans un étau cette longue tige de fer *n o* (*fig.* 46), écartons-la de sa position d'équilibre et lâchons-la. Pour rendre ses vibrations plus visibles, projetons son ombre sur un écran, à l'aide de la lumière électrique. Elle vibre dans son ensemble, animée d'un mouvement de va-et-vient entre les points extrêmes *p* et *p'*. Mais elle est susceptible d'autres modes de vibrations. En effet, amortissons-la au point *a* en la tenant doucement entre le doigt et le pouce, et frappons-la vivement entre *a* et *o*. Elle se divise aussitôt en deux parties vibrantes, séparées par un nœud (*fig.* 47). Vous voyez sur l'écran l'ombre en forme de fuseau entre *a* et l'étau, et l'éventail d'ombre au-dessus du point *a*, avec le nœud entièrement

Fig. 46. Fig. 47. Fig. 48.



noir qui les sépare. On peut effectuer cette même division, sans amortir en *a*, par un choc rapide imprimé à la verge entre *a* et *o*. Dans ce cas, cependant, en outre de ses deux parties vibrantes, la verge oscille comme un tout, et les oscillations partielles sont superposées à l'oscillation totale. Vous remarquerez, en outre, que l'amplitude des oscillations partielles dépend de la rapidité du coup. Si l'on frappe mollement, la division partielle est faiblement indiquée, et l'oscillation totale très-marquée. Si, au contraire, le choc est sec et rapide, l'oscillation totale est faible et les oscillations partielles se font avec une grande force. Supposons maintenant que les vibrations de la verge soient assez rapides pour produire un son musical ; en vibrant sur toute sa longueur, elle rend le son fondamental, tandis que les divisions de la verge en deux segments vibrants correspondront au premier de ses sons harmoniques. Si, en outre, la verge, en même temps qu'elle vibre tout entière, se divise en segments, on entendra simultanément le son fondamental et les sons harmoniques. En amortissant au point voulu et frappant la verge comme on doit la frapper, on parvient à la subdiviser encore, comme l'indique la figure 48.

Raccourcissons notre verge, afin que ses vibrations soient mieux en rapport avec nos nerfs acoustiques. La voici réduite à dix centimètres de longueur. Promenons un archet sur son extrémité supérieure, et nous entendrons un son musical assez grave. Raccourcissons-la encore, le son est plus élevé. En continuant de la raccourcir, nous augmenterons sans cesse la vitesse des vibrations, et le son deviendra assez aigu pour causer une sensation pénible. Ces vibrations musicales diffèrent seulement par leur rapidité des oscillations mécaniques qui tout à l'heure faisaient appel à notre regard.

Cette augmentation de la vitesse de vibration est réglée par une loi : le nombre des vibrations accomplies dans un temps donné est inversement proportionnel au carré de la longueur de la verge. Vous entendez le son rendu par cette lame de laiton d'une longueur de cinq centimètres, quand je passe sur son extrémité un archet de violon. Réduisons cette longueur à deux centimètres et demi ; le son qui se produit maintenant est la double octave du précédent, c'est-à-dire que la vitesse de vibration s'est quadruplée. De même, si nous doublons la longueur, nous réduisons la vitesse de vibration au quart de ce qu'elle était ; elle ne sera plus qu'un neuvième, si nous triplons, qu'un seizième, si nous quadruplons la longueur, etc. Il est évident qu'en continuant ainsi nous atteindrons une longueur telle que les vibrations soient assez lentes pour que l'œil puisse les compter. Réciproquement, en partant d'une verge assez longue pour que ses vibrations puissent être comptées, nous pourrions, en la raccourcissant, non-seulement l'amener à rendre des sons, mais arriver à déterminer les nombres de vibrations des divers sons qu'elle rendra successivement. Par exemple, une règle de 90 centimètres, faisant une vibration par seconde, réduite successivement à 30, 15, 7 $^1/_2$, 2 $^1/_2$ centimètres, conformément à la loi ci-dessus énoncée, fera 9, 36, 144, 1296 vibrations par seconde. Il est facile de remplir les vides entre ces longueurs, et de déterminer ainsi la vitesse de vibrations particulière à chaque son. Cette méthode a été proposée et appliquée par Chladni.

On peut construire un instrument de musique avec une série de petites verges métalliques. Vous voyez implantés en cercle, sur ce plateau de bois, de solides tiges de fer de différentes longueurs. En les attaquant avec un archet, nous leur faisons rendre des sons très-agréables ; un exécutant habile saurait certainement faire avec un nombre suffisant de semblables tiges une musique très-tolérable. L'instrument appelé *violon de fer* est construit sur ce principe. Les sons des boîtes à musique ordinaires sont produits par de petites languettes métalliques fixées par l'une de leurs extrémités. Des pointes convenablement distribuées à la surface d'un cylindre tournant rencontrent les extrémités libres de ces languettes, les soulèvent et les laissent subitement retomber : elles vibrent ; leurs longueurs et leur roideur sont d'ailleurs calculées de manière à donner les nombres de vibrations voulus.

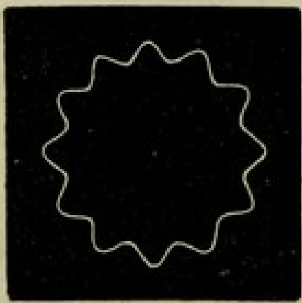
M. Wheatstone a imaginé une méthode optique aussi ingénieuse que simple d'étudier les vibrations des verges fixées par une de leurs extrémités. Il attache au sommet de la verge métallique une perle en verre légère et argentée à l'intérieur ; puis, faisant tomber sur cette perle la lumière d'une lampe ou d'une bougie, il fait naître par réflexion un point lumineux très-brillant. Lorsque la verge vient à vibrer, ce point met pleinement en évidence le caractère propre de ses vibrations. Une aiguille à tricoter prise dans un étau, et sur la pointe libre de laquelle on a fixé à la glu marine une petite boule argentée, peut donner une idée suffisante de ce phénomène. Dans l'instrument plus complet de M. Wheatstone, qui a reçu le nom de *kaléidophone*, on obtient de cette manière de belles figures, et nous croyons utile d'en projeter quelques-unes très-agrandies sur cet écran.

Fixons la verge horizontalement dans l'étau, et faisons tomber sur la perle argentée de son extrémité un faisceau de lumière électrique, qui nous donnera un point lumineux comparable au soleil par son éclat. Installons une lentille convergente sur le trajet du rayon réfléchi en avant de la perle, et projetons agrandie sur l'écran l'image de la perle très-éclairée. Ecartons la verge et lâchons-la. Le point brillant décrit un ruban de lumière, d'abord rectiligne, mais qui s'épanouit rapidement en ellipse, devient un cercle, redevient une ellipse, et finit par être encore une ligne droite prête à se transformer de nouveau. Ces transformations successives viennent de ce qu'une verge, ainsi fixée dans un étau, ne vibre pas seulement dans la direction suivant laquelle on l'a lâchée, mais aussi perpendiculairement à cette direction[1]. La courbe décrite résulte de la combinaison des deux vibrations rectangulaires. Il nous sera facile de constater qu'en même temps que la verge vibre tout entière, elle peut se diviser en segments vibrants. En l'attaquant convenablement par un archet, amenons la figure projetée à représenter un cercle dentelé (*fig.* 49), résultant d'un certain nombre de petites ondulations superposées à la plus grande. La verge, en même temps, rend un son musical que nous

[1] Chladni observa aussi ces vibrations composées, et il exécuta une série d'expériences qui contiennent implicitement celles du Kaléidophone. Nous étudierons dans une autre Leçon l'important phénomène de la composition des vibrations.

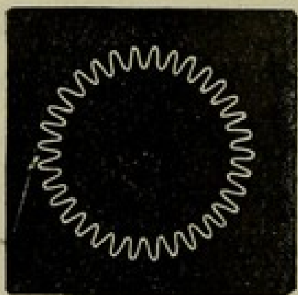
n'entendions pas quand elle vibrait tout entière; c'est que ses oscillations étaient de fait trop lentes pour devenir so-

Fig. 49



nores. Les vibrations qui produisent ces sinuosités, et qui correspondent à la première division de la verge, sont à peu près 6 fois et un quart plus rapides que les vibrations de la verge entière. Attaquons de nouveau avec l'archet; le ton de la note s'élève, les dentelures courent plus serrées les unes après les autres, formant sur l'écran un peigne lumineux circulaire (*fig.* 50), à dents plus petites et plus nom-

Fig. 50.



breuses, plus beau encore que le précédent; il résulte des vibrations de la seconde division de la tige, dix-sept fois et un tiers ($17 \frac{13}{36}$) plus rapides que les vibrations de la tige entière. Chaque changement de son survenu dans la tige se dessine ainsi sur l'écran.

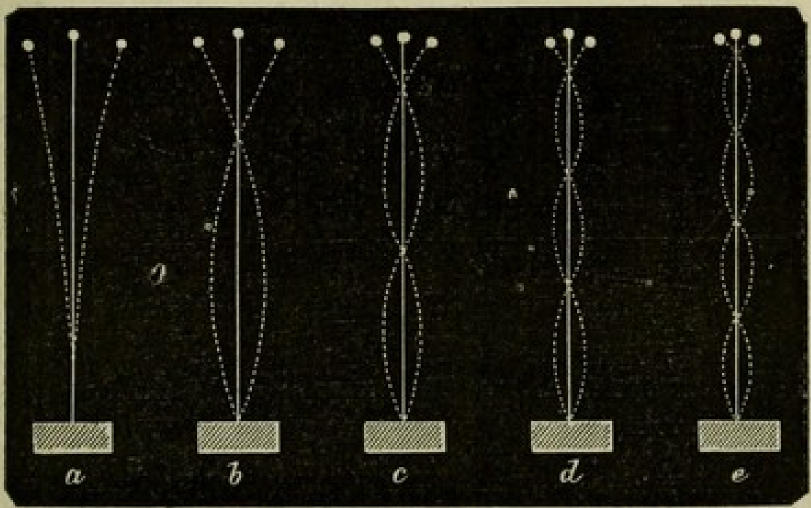
La vitesse de vibration de la tige entière est à la vitesse qui correspond à la première division, à peu près comme le carré de 2 est au carré de 5, ou comme 4 : 25. A partir de la première division, les vitesses de vibration sont à peu près proportionnelles aux carrés de la suite des nombres impairs

3, 5, 7, 9, etc. En admettant que la tige, dans sa longueur totale, fasse un nombre entier de vibrations par seconde, 36 par exemple : les nombres de vibrations de la tige entière et de ses subdivisions successives seront exprimés approximativement par la série des nombres :

36, 225, 625, 1225, 2025, etc.

Dans la figure 51, *a*, *b*, *c*, *d*, *e* indiquent les modes de division correspondant à ces nombres. On voit que les sons

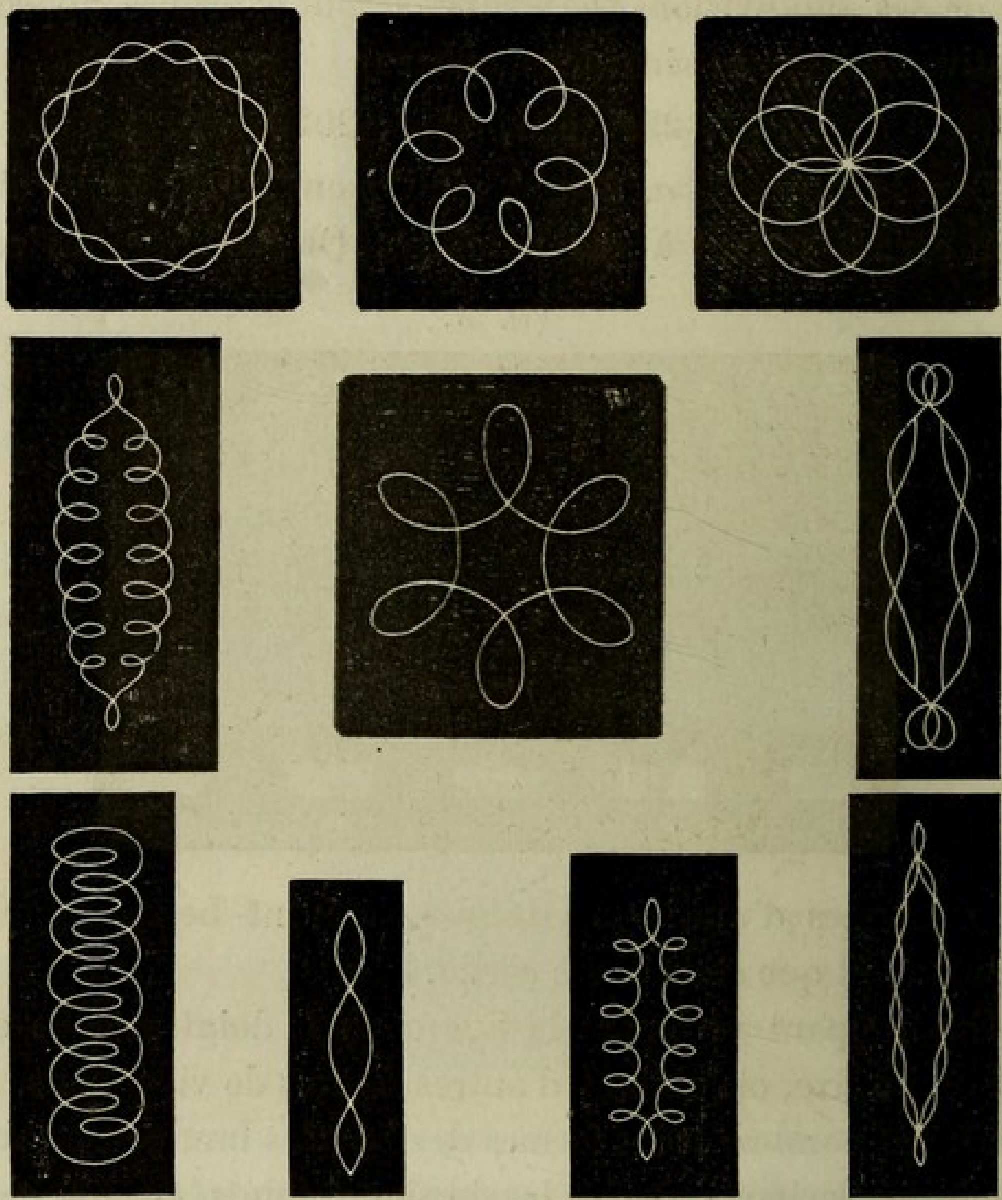
Fig. 51.



harmoniques d'une tige vibrante s'élèvent beaucoup plus rapidement que ceux d'une corde.

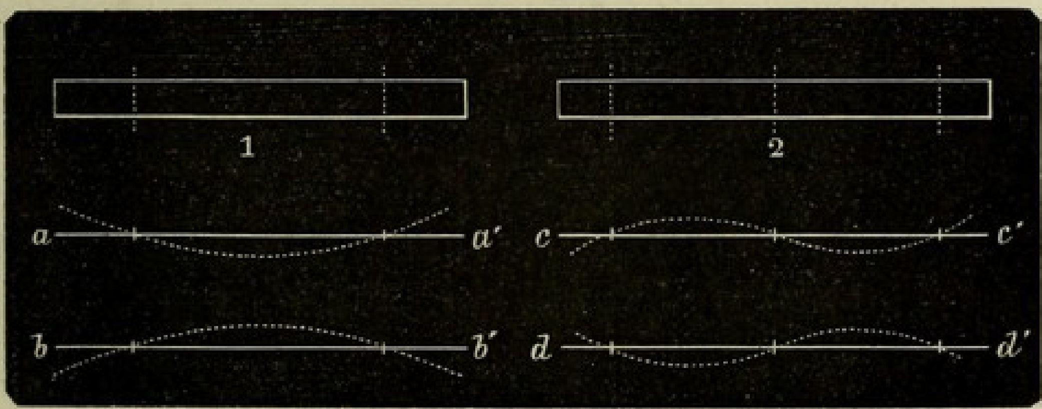
En frappant vivement la tige avec le doigt près de son extrémité fixe, on obtient d'autres figures de vibrations. En réalité le nombre et les formes des boucles lumineuses ainsi produites varient à l'infini ; les dessins ci-joints (*fig*. 52), choisis parmi ceux que M. Wheatstone obtint le premier, donneront une idée de leur beauté. On les produit en éclairant les perles argentées par la lumière du soleil ou celle d'une bougie. En employant deux bougies au lieu d'une, on double les figures. On a alors deux points brillants dont chacun décrit sa ligne lumineuse, lorsque la tige ou l'aiguille à tricoter exécute ses vibrations. Nous aurons à nous initier dans une autre leçon à l'application que M. Wheatstone a faite de sa méthode pour rendre plus facile l'étude des vibrations rectangulaires.

Fig. 52.



Passons maintenant d'une verge ou d'une tige fixée par un de ses bouts au cas de verges ou tiges libres à leurs deux extrémités; car on a fait usage en musique de semblables verges. Chladni, le père de l'acoustique moderne, a déterminé expérimentalement, par une méthode que nous décrirons plus tard, les modes de vibrations possibles de ces verges. Le mode de division le plus simple a lieu lorsque la verge est partagée par deux nœuds en trois parties vibrantes. Il est facile de le réaliser sur cette règle de bois longue de deux mètres. La tenant entre le pouce et l'index des deux mains, en deux points distants d'un tiers de mètre de ses deux extrémités, puis l'ébranlant ou la frappant à son centre, de manière à la faire vibrer, on voit que le segment du milieu forme un fuseau ombré, tandis que les deux segments extrêmes s'épanouissent en éventail. Projetée sur l'écran, l'ombre de la règle met beaucoup mieux en évidence ce mode de subdivision et de vibrations des parties subdivisées. Dans ce cas, la distance des deux nœuds aux extrémités de la règle est à peu près le quart de la distance entre les deux nœuds. Dans son second mode de vibration, la règle est partagée par trois nœuds en quatre segments vibrants. Ces deux modes sont représentés 1 et 2 (*fig.* 53). Les lignes ponc-

Fig. 53.



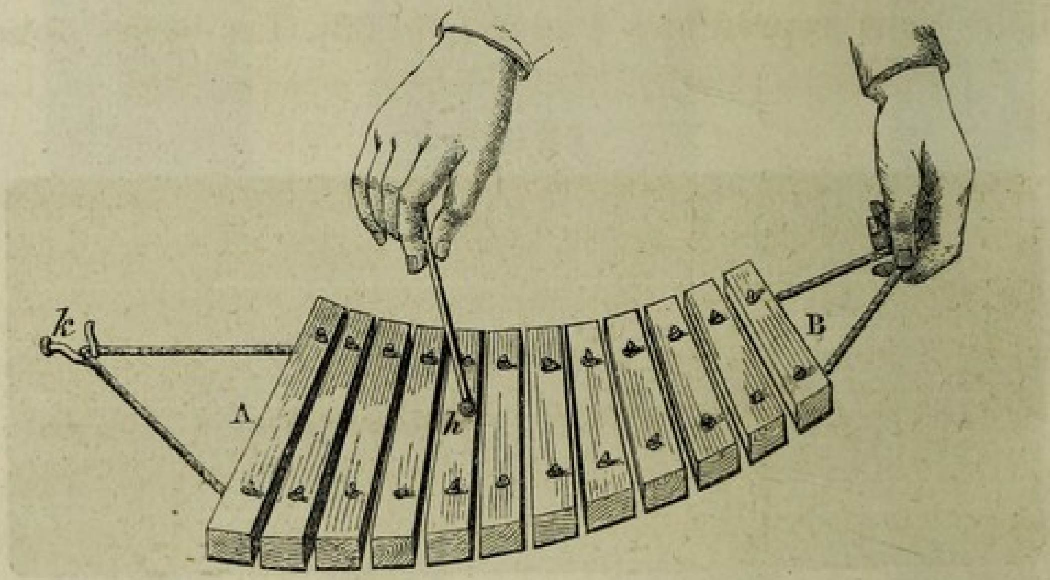
tuées aa' bb' (1), cc' dd' (2) montrent comment, dans le premier et dans le second mode de division de la barre, les segments se courbent alternativement en haut et en bas. Le son le plus bas d'une verge libre à ses deux bouts est plus élevé que le son le plus grave de la même verge fixée à l'une de ses extrémités, dans le rapport de 4 à 25. En commençant par le cas plus simple de deux nœuds, les nombres de vibrations de la verge libre augmentent dans la proportion suivante :

Nombre des nœuds, ...	2, 3, 4, 5, 6, 7.
Nombres aux carrés desquels les nombres de vibrations sont approximativement proportionnels	3, 5, 7, 9, 11, 13.

Nous retrouvons ici la même élévation rapide de ton que nous avons déjà signalée dans les deux cas précédents.

Pour les applications à la musique, on n'utilise que les vibrations des verges libres à leurs deux extrémités. En réunissant de simples lames de bois de longueurs, de largeurs et d'épaisseurs différentes, par une même corde qui les traverse à leurs nœuds, on réalise un instrument très-primitif, le *claque-bois* des Sauvages, AB (*fig.* 54). Fixant un

Fig. 54.

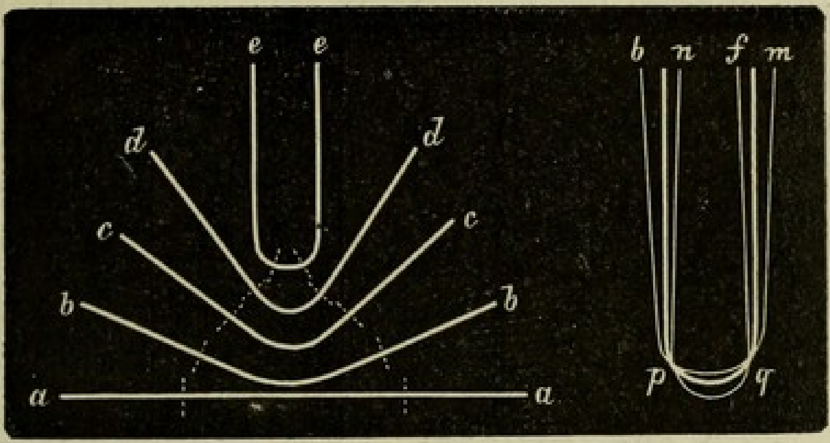


des bouts des cordes à un crochet et tenant l'autre bout dans la main gauche, on frappe avec la main droite, armée d'une baguette, sur la série des lames, et l'on produit une succession agréable de sons musicaux. Au lieu de les relier par une corde, on peut simplement faire poser les lames par leurs nœuds sur des cylindres de paille tressée ; l'instrument prend alors le nom de *violon de paille*. Chladni nous apprend qu'on l'introduisit dans l'opéra de *La Flûte enchantée* de Mozart, pour imiter le jeu des cloches.

Si, au lieu de lames de bois, nous faisions usage de lames de verre, nous aurions l'*Harmonica*.

Les vibrations d'une verge libre à ses deux bouts nous conduisent naturellement aux vibrations des diapasons, analysées par Chladni. Supposons que *aa* (*fig.* 55) représente

Fig. 55.



un barreau droit d'acier avec les deux nœuds correspondants à son premier mode de division, indiqués par les lignes ponctuées. Courbons ce barreau et donnons-lui la forme *bb* ; les deux points nodaux subsisteront encore, mais plus rapprochés l'un de l'autre que dans le cas précédent. Le son du barreau recourbé est d'ailleurs un peu plus grave que celui du barreau droit. En faisant passer le barreau par divers degrés de courbure, tels que *cc*, *dd*, nous finissons par le convertir en un diapason *ee*, à branches parallèles et gardant toujours ses deux nœuds, beaucoup plus voisins toutefois que quand le barreau était droit. Si on lui fait rendre sa note la plus grave, ses extrémités libres oscillent comme l'indique la figure 56 ; les deux branches vibrent entre les limites *bn* et *fm* avec leurs nœuds en *p* et *q*.

Il n'existe pas pour le diapason de mode de division correspondant à celui d'un barreau droit en quatre segments séparés par trois nœuds.

Le premier harmonique exige un nœud sur chaque branche; le second correspond à deux nœuds situés sur la base. Le principe de Young, énoncé page 123, s'étend aux diapasons. Pour avoir le son fondamental, sans mélange d'un son harmonique donné, il faut attaquer transversalement par l'archet un point où ce son harmonique exige la présence d'un nœud. Dans le troisième mode de division, il y a deux nœuds sur chaque branche et un à la base. Dans le quatrième, il y a deux nœuds sur chaque branche et deux à la base; dans le cinquième, trois nœuds sur chaque branche et un à la base. Les vibrations du premier harmonique sont, suivant Chladni, $6\frac{1}{4}$ fois plus rapides que celles du son fondamental. Il est facile de faire entendre les sons harmoniques des diapasons. Prenons, par exemple, dans notre assortiment quatre diapasons dont les nombres de vibrations sont respectivement 256, 320, 384 et 512 par seconde. Passons du ton fondamental au premier harmonique de chacun; vous remarquez que l'intervalle entre le premier harmonique et le son fondamental est plus grand ici que dans le cas d'une corde vibrante. Des nombres donnés tout à l'heure nous sautons d'un seul bond aux nombres 1600, 2000, 2400, 3200. Toutefois les nombres conclus de la règle de Chladni, quoique approximativement exacts, n'ont pas été tous rigoureusement vérifiés par l'expérience. Deux diapasons, par exemple, peuvent avoir le même son fondamental et des harmoniques différents. Voici deux diapasons qui se trouvent dans ce cas. Faisons entendre d'abord leurs sons fondamentaux, l'unisson est parfait. Faisons-leur rendre les deux premiers sons harmoniques, ils ne sont plus à l'unisson : vous entendez des *battements* rapides qui froissent l'oreille. En collant un peu de cire à la branche de l'un des diapasons pour lui donner un peu plus de poids, nous ramenons les harmoniques à l'unisson; mais alors les sons fondamentaux produisent à leur tour des battements qui nous impressionnent désagréablement, quand on les fait résonner ensemble. Le désaccord ne se produirait pas si la vitesse de vibration de chaque harmonique était exactement 6 $\frac{1}{4}$ fois plus grande que celle du son fondamental. Dans une série de diapasons examinés par M. Helmholtz, le nombre des vibrations du premier harmonique était de 5 $\frac{4}{5}$ à 6 $\frac{3}{5}$ fois celui des vibrations du son fondamental. A partir du premier harmonique inclusivement, les nombres de vibrations de toute la série des harmoniques sont entre eux comme les carrés des nombres impairs 3, 5, 7, 9, etc. : c'est-à-dire que dans le temps exigé par le premier harmonique pour exécuter 9 vibrations, le second en exécute 25, le troisième 49, le quatrième 81, et ainsi de suite. Les harmoniques du diapason s'élèvent donc avec une bien plus grande rapidité que ceux des cordes. Mais en même temps ils s'évanouissent plus rapidement et altèrent moins par leur mélange la pureté du son fondamental.

L'artifice imaginé par Chladni pour rendre visibles les vibrations sonores a fait faire un pas considérable à la science de l'acoustique. Lichtenberg avait eu l'idée de répandre de la poussière de soufre à la surface d'un gâteau de résine électrisé ; l'arrangement de la poussière lui révéla la condition électrique de la surface du gâteau. Cette expérience suggéra à Chladni la pensée de rendre visibles les vibrations sonores en versant du sable à la surface du corps vibrant. Chladni a fait lui-même de sa découverte un compte-rendu assez intéressant pour justifier sa reproduction dans ces pages.

« Grand admirateur de musique dont j'avais commencé l'étude un peu tard, dans ma dix-neuvième année, je remarquai que l'acoustique était moins avancée que la plupart des autres branches de la physique expérimentale. Cette remarque m'inspira le désir de faire cesser cette infériorité, et de contribuer par quelque découverte au progrès de cette partie de la science. En 1785, j'avais observé qu'une plaque de verre ou de métal rendait des sons différents quand on la frappait sur différents points; mais je ne pus trouver nulle part le moindre éclaircissement sur les modes de vibrations correspondants. Vers cette époque apparut dans les journaux la description d'un instrument construit en Italie par l'abbé Mazocchi, et composé de cloches que l'on faisait sonner au moyen de un ou deux archets de violon. Ce fait m'inspira l'idée de recourir à l'archet pour examiner les vibrations des différents corps sonores. Lorsque j'appliquai l'archet à une plaque ronde de verre fixée par son centre, j'en tirai différents sons dont les nombres de vibrations par seconde étaient représentés par les carrés de 2, 3, 4, 5, etc.; mais la nature des mouvements auxquels correspondaient respectivement ces divers sons et les moyens de reproduire chacun d'eux à volonté restaient tout à fait inconnus pour moi. Les expériences sur les figures électriques à la surface d'un gâteau de résine, découvertes et publiées par Lichtenberg dans les mémoires de la Société Royale de Gœttingue, me firent présumer que les différents mouvements vibratoires d'une plaque sonore pourraient se présenter sous des apparences différentes, si je répandais à sa surface du sable très-fin ou quelque autre matière pulvérulente. Dans le premier essai de ce moyen, la figure qui s'offrit à mes yeux sur la plaque circulaire ressemblait à une étoile à dix ou douze rayons, et le son très-aigu qu'elle rendait dans la série indiquée ci-dessus correspondait au carré du nombre des lignes diamétrales. »

Répétons maintenant les expériences de Chladni, en commençant par la plaque de verre carrée fixée en son centre dans un étau convenablement disposé : on pourra tout simplement la tenir entre le pouce et l'index quand la plaque sera assez petite. Répandons un peu de sable à sa surface, amortissons ou déterminons un nœud au point milieu de l'un de ses bords en touchant légèrement avec l'ongle, et frottons avec l'archet le bord de la plaque près de l'un de ses angles. Le sable est rejeté de certaines parties de la surface et il se rassemble le long de deux *lignes nodales* qui divisent le grand carré en quatre carrés plus petits (*fig.* 57).

Fig. 57.

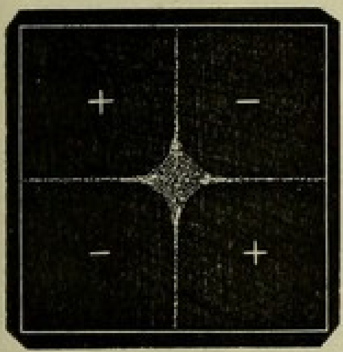


Fig. 58.

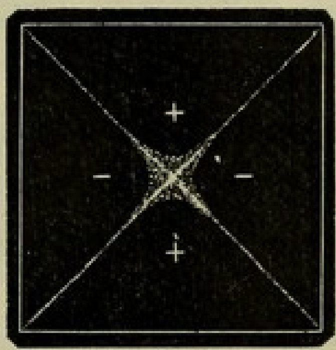
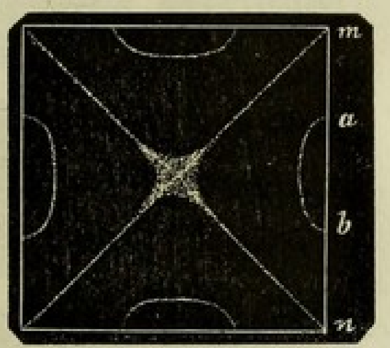


Fig. 59.



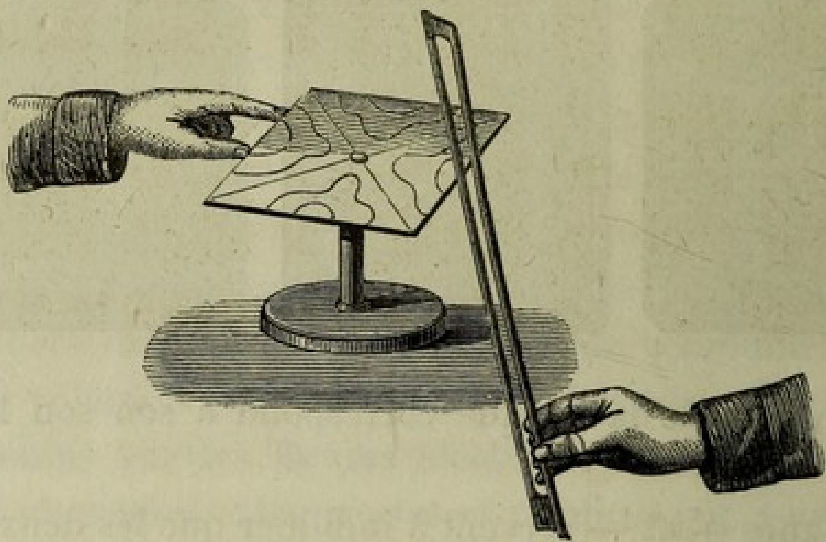
Cette division de la plaque correspond à son son le plus grave.

Les signes + et — servent à indiquer que les deux carrés sur lesquels ils se trouvent se meuvent dans des directions opposées. Lorsque les deux carrés notés + sont au-dessus du niveau moyen de la plaque, les deux carrés notés — sont au-dessous de ce même niveau. Les lignes nodales marquent les limites de ces mouvements opposés. Elles sont les lieux de transition d'un de ces mouvements à l'autre et ne sont, par conséquent, nullement affectées par eux.

Après avoir de nouveau saupoudré la plaque, amortissons à l'un des angles, et attaquons avec l'archet le milieu de l'un des côtés. Le sable danse sur toute la surface et finit par se tasser sur deux lignes diagonales (*fig.* 58). La note produite est plus élevée d'une quinte que la précédente. Amortissons maintenant aux points *a* et *b* (*fig.* 59), et passons l'archet sur le milieu du côté opposé, nous obtenons un son beaucoup plus aigu que dans les deux premières expériences. La manière dont la plaque se subdivise et vibre pour produire cette note est représentée dans la figure 60.

Nous avons expérimenté jusqu'ici sur des plaques de verre fixées par leur centre. On peut leur substituer des plaques métalliques qui se prêtent bien à l'expérience. Voici une plaque de laiton de 33 centimètres de côté. Amortissons

Fig. 60.

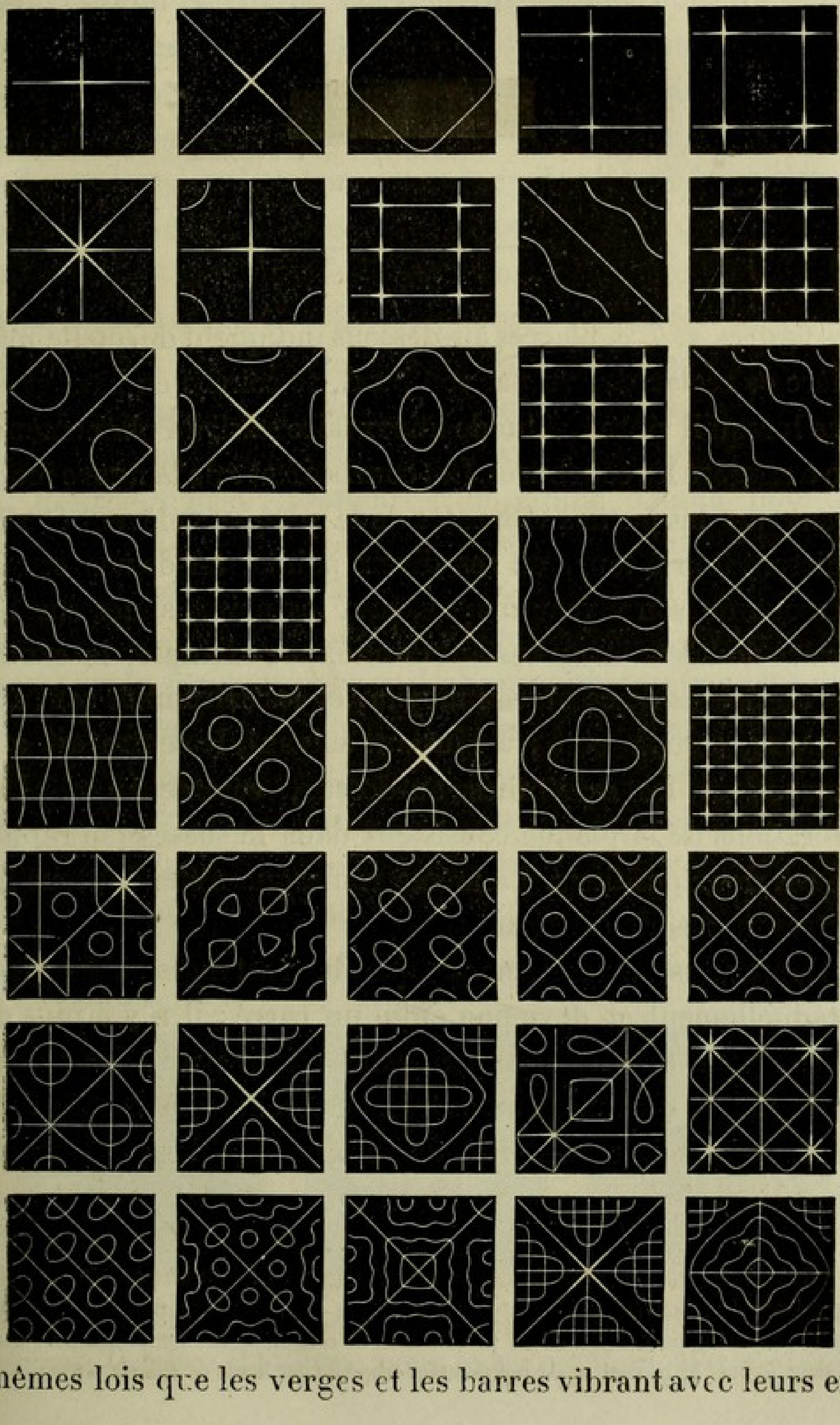


en deux points de l'un de ses bords avec deux doigts de la main gauche, et avec la main droite attaquons par l'archet le milieu du côté opposé. Nous obtenons le dessin (*fig.* 60).

La planche 61 représente une série de très-beaux dessins que Chladni a obtenus en amortissant et en attaquant la plaque avec l'archet sur des points convenablement choisis. Il n'est pas seulement intéressant, il est étonnant de voir la soudaineté avec laquelle ces lignes si nettement dessinées apparaissent au commandement de l'archet d'un expérimentateur habile.

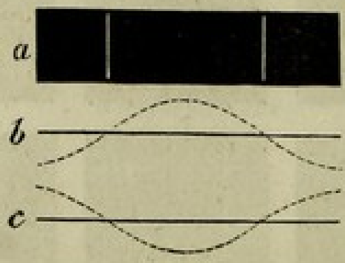
Examinons maintenant d'un peu plus près le mécanisme de ces vibrations. Nous savons déjà comment se divise une barre libre à ses deux extrémités et vibrant transversalement. Une plaque rectangulaire de verre ou de métal, par exemple une des lamelles de verre de l'harmonica, obéissent aux

Fig. 61.



mêmes lois que les verges et les barres vibrant avec leurs extrémités libres. La figure 62 représente un rectangle *a*, avec deux nœuds correspondant à son premier mode de division ;

Fig. 62.



les figures *a*, *b*, *c*, placées au-dessous indiquent de quelle manière ce rectangle, vu par son bord, se courbe en haut et en bas lorsqu'il vibre [1]. Afin de mieux faire saisir le phénomène, on a exagéré les courbures. Les courbes *b* et *c* de la figure montrent que les parties vibrantes de la plaque s'élèvent et s'abaissent tour à tour, en ses divers points, au-dessus et au-dessous de son niveau moyen, sauf les points situés sur les lignes nodales. A un instant donné, par exemple, le centre est au-dessus de ce niveau moyen, et les extrémités sont au-dessous, comme en *b* ; à l'instant suivant, le centre est au-dessous et les extrémités au-dessus, comme en *c*. Les vibrations de la plaque consistent dans la succession rapide de ces deux positions. La même remarque s'étend à tous les autres modes de division.

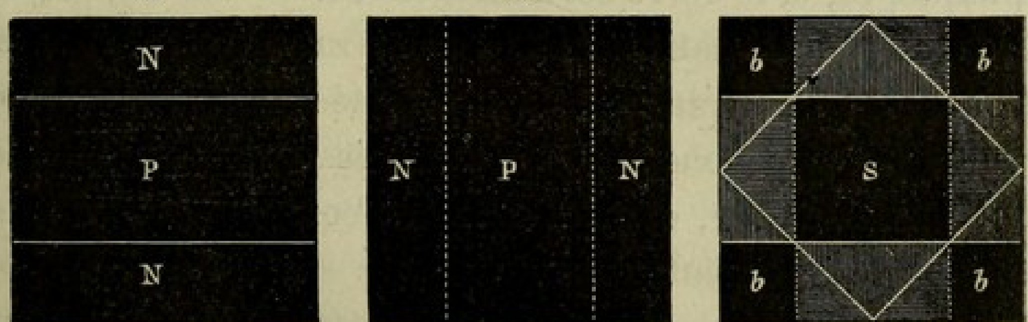
Supposons actuellement que le rectangle s'élargisse graduellement et devienne enfin un carré ; il n'y a plus de raison pour que les lignes nodales soient parallèles à deux côtés plutôt qu'aux deux autres. Cherchons à reconnaître le résultat de la coexistence de deux semblables systèmes de vibration.

[1] Cette figure est une copie de celle d'un mémoire de M. Wheatstone. Les nœuds, cependant, devraient être plus près des extrémités, et les parties terminales libres des lignes ponctuées ne devraient être ni concaves ni convexes. Les lignes nodales, dans les deux figures *b*, *c*, sont aussi représentées trop loin des bords de chaque plaque.

Pour la clarté du raisonnement, prenons deux carrés de verre, et traçons sur chacun d'eux les lignes nodales qui sont propres d'un rectangle. Pour les distinguer, nous les tracerons en blanc sur l'un des carrés, et en noir sur l'autre. Ce petit artifice nous aidera à distinguer dans notre esprit les deux plaques, comme nous les distinguons par la vue. Cela fait, superposons les deux plaques de manière à faire coïncider les lignes nodales, et concevons en esprit qu'elles sont en plein état de vibration. Supposons d'abord que les vibrations des deux plaques soient concurrentes ou d'accord ; que les segments du milieu et des extrémités montent et s'abaissent ensemble ; puis, concevons que les vibrations de l'une des plaques soient transportées à l'autre. Qu'en résultera-t-il ? Évidemment des vibrations d'amplitude double pour la plaque sur laquelle a eu lieu le transport. Mais admettons que les vibrations des deux plaques, au lieu de se faire dans le même sens, se fassent dans des directions exactement opposées, que le segment moyen de l'une s'abaisse pendant que le segment moyen de l'autre s'élève. Quelle sera la conséquence de la superposition de ces mouvements contraires. Évidemment la neutralisation complète de toute vibration.

Au lieu de faire coïncider les lignes nodales des plaques, mettons-les à angle droit les unes sur les autres, c'est-à-dire

Fig. 63.

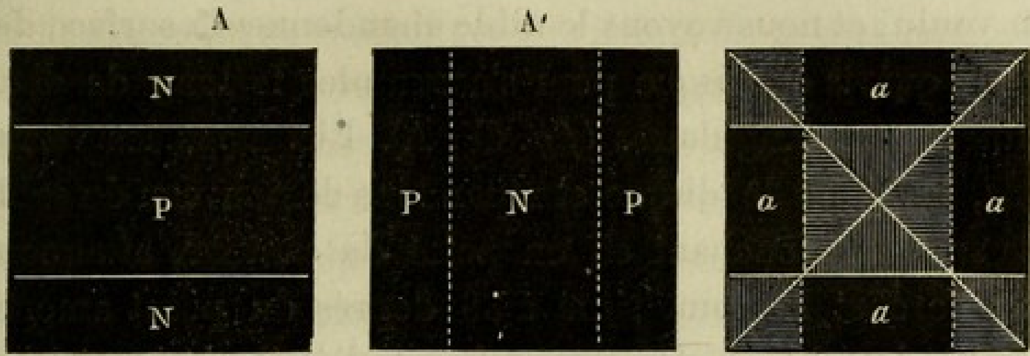


faisons glisser la plaque A sur la plaque A′ (*fig.* 63). Dans ces figures, la lettre P indique pour le segment où elle se trouve un mouvement positif ou dirigé de bas en haut, N, un mouvement négatif ou dirigé de haut en bas. Il résulte de la superposition, comme le montre la troisième figure, une sorte de mosaïque, formée d'un carré S au milieu, d'un carré plus petit à chaque angle, et de quatre rectangles occupant les milieux des quatre côtés. Concevons que les plaques vibrent, que les vibrations des segments correspondants soient concurrentes, comme l'indiquent les lettres P, N, et que les vibrations de l'une des plaques soient transportées à l'autre, qu'arrivera-t-il? Il suffit d'un moment de réflexion pour voir que le grand carré du milieu vibrera avec une énergie double; qu'il en sera de même des petits carrés des quatre angles; mais que les vibrations des quatre rectangles qui sont en opposition se neutraliseront là où les amplitudes seront égales. Le milieu de chaque côté de la plaque sera donc un point de repos; et il en sera de même des points où les lignes nodales des deux plaques se croisent. Unissons par des lignes droites chaque système de ces trois points, et nous obtiendrons un second carré inscrit dans le premier : les côtés de ce carré seront des lignes nodales ou sans mouvement.

Nous n'avons fait jusqu'ici que de la théorie. Saisissons maintenant cette plaque carrée de verre vers le milieu de l'un de ses côtés, attaquons avec l'archet l'angle adjacent de la plaque, et, si le verre est homogène, nous verrons se produire très-approximativement le carré inscrit. La raison en est que, lorsque la plaque est ainsi excitée, les deux systèmes de vibration que nous avons considérés coexistent actuellement sur la plaque, et produisent en conséquence la figure résultant de leur combinaison.

Plaçons encore les deux carrés de verre l'un sur l'autre; mais au lieu de supposer que les vibrations des segments correspondants sont concurrentes ou de même sens, admettons qu'elles sont opposées, c'est-à-dire que A recouvre A′ (*fig.* 64). Il est manifeste que dans la superposition des vi-

Fig. 64.



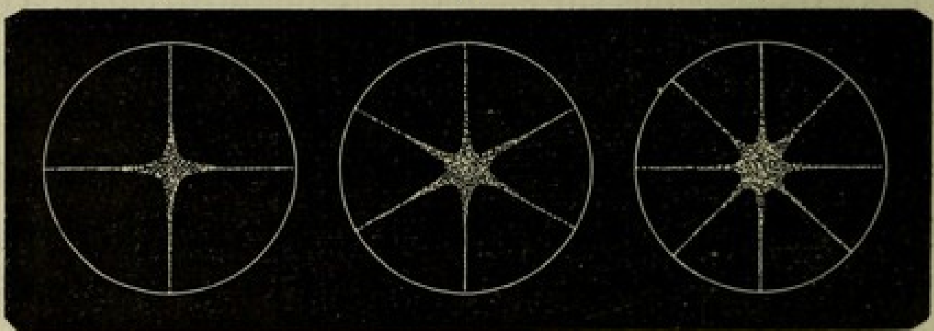
brations le centre du carré du milieu sera un point de repos, parce que les vibrations y seront égales et opposées. Les intersections des lignes nodales et les quatre angles de la plaque seront pareillement des points de repos, parce que les vibrations y seront aussi égales et de sens opposés. Nous avons donc quatre points de repos sur chaque diagonale du carré. Tirons ces diagonales, elles représenteront les lignes nodales résultant de la superposition des vibrations.

Ces deux systèmes de vibrations coexistent réellement sur une plaque dont on amortit le centre et un des angles, pendant qu'on attaque avec l'archet le milieu de l'un des côtés. Dans ce cas, le sable qui marque les lignes de repos se dispose en effet le long des diagonales. Nous avons ainsi donné dans les termes les plus simples possibles un exemple de la manière dont M. Wheatstone comprend l'analyse des vibrations superposées.

Si nous passons des plaques carrées aux plaques circulaires, nous obtiendrons également de très-beaux effets. Prenons, par exemple, ce disque de laiton porté horizontalement par un support vertical. Le disque est noir, recouvrons-le d'une légère couche de sable blanc. Il peut se diviser en segments de bien des manières et rend un grand nombre de sons de tons différents. Faisons-lui rendre d'abord sa note fondamentale ou la plus basse, en touchant sa circonférence en un certain point et attaquant, avec l'archet, un point de son contour à 45° du premier. Nous entendons le son voulu, et nous voyons le sable abandonner la surface des quatre quarts du disque pour s'accumuler le long de deux diamètres rectangulaires (*fig.* 65, A). Éteignons les vibrations, balayons le disque et répandons de nouveau du sable à sa surface. Touchant en un point du contour, attaquons avec l'archet le point situé à 30 degrés du point amorti. Aussitôt le sable se dépose en forme d'étoile à six rayons. La plaque s'est en effet partagée en six segments vibrants, séparés les uns des autres par des lignes nodales centrales (*fig.* 65, B). Touchons encore et attaquons avec l'archet un

Fig. 65.

A B C

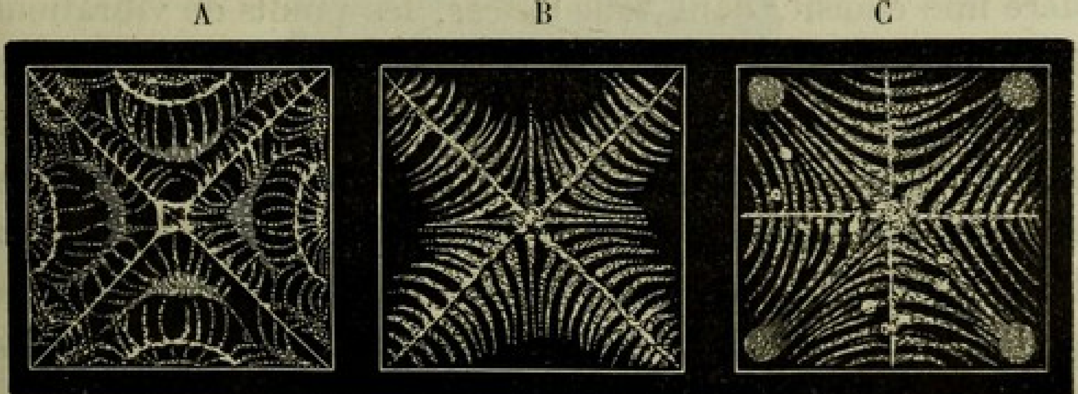


point plus rapproché que celui de l'expérience précédente, le disque se divise de lui-même en huit segments séparés par des lignes de sable, comme dans la figure 65, C. Nous pourrions continuer à partager le disque en dix, douze, quatorze segments, le nombre des segments restant toujours un nombre pair. A mesure que les segments deviennent plus petits, les vibrations deviennent plus rapides, et le ton, par conséquent, est de plus en plus élevé. La note correspondante à la division en seize segments est si aiguë qu'elle blesse presque les oreilles. Vous connaissez maintenant la première découverte de Chladni. Vous comprenez l'émotion qu'il éprouva quand il fut témoin pour la première fois de ces faits merveilleux « *qu'aucun mortel n'avait encore vus.* » Ce sont ses propres paroles. En rendant libre le centre de la plaque et la touchant en des points de sa surface convenablement choisis, il sut obtenir pour lignes nodales des cercles ou d'autres courbes fermées.

La vitesse de vibration d'un disque est directement proportionnelle à son épaisseur et inversement proportionnelle au carré de son diamètre. Voici trois disques : deux d'entre eux ont le même diamètre, mais l'épaisseur de l'un est double de l'épaisseur de l'autre ; deux ont la même épaisseur, mais le diamètre de l'un est double du diamètre de l'autre. Conformément à la loi que nous venons d'énoncer, les vitesses ou les nombres de vibrations de ces trois disques seront proportionnels aux trois nombres 1, 2, 4. Faisons-les résonner successivement, et les oreilles exercées reconnaîtront sans peine que les trois sons sont entre eux dans le rapport d'un son fondamental à son octave et à sa double octave.

Il est intéressant d'étudier les mouvements du sable dans leurs rapports avec les ventres et les nœuds, en l'unissant à une substance semi-fluide, qui gêne un peu ses déplacements. Voici (*fig.* 66) quelques spécimens de figures dans lesquelles

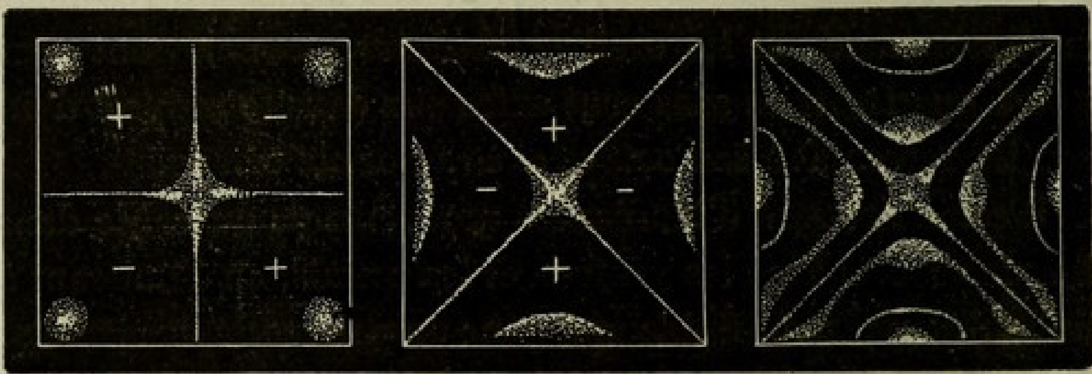
Fig. 66.



le mouvement du sable a été gêné par l'addition d'un peu de gomme. Chaque courbe individuelle était très-clairement dessinée à la surface des plaques. On en a pris l'empreinte, et sur ces empreintes on a gravé les dessins A, B, C.

Notons ici une particularité des plaques vibrantes qui a longtemps embarrassé les expérimentateurs. Répandons sur la plaque une poussière très-fine mêlée au sable. L'effet qu'il s'agit d'obtenir est aussi saillant que possible quand cette poussière est la poudre très-fine du lycopode. Au lieu de se rassembler sur les lignes nodales, cette substance si légère forme de petits amas aux lieux où le mouvement est le plus violent. Vous voyez ces petits tas aux quatre angles de la plaque (*fig.* 67), sur les milieux des quatre côtés de la plaque (*fig.* 68), et logés entre les lignes nodales de la plaque (*fig.* 69). Ces trois dessins représentent les trois états de vi-

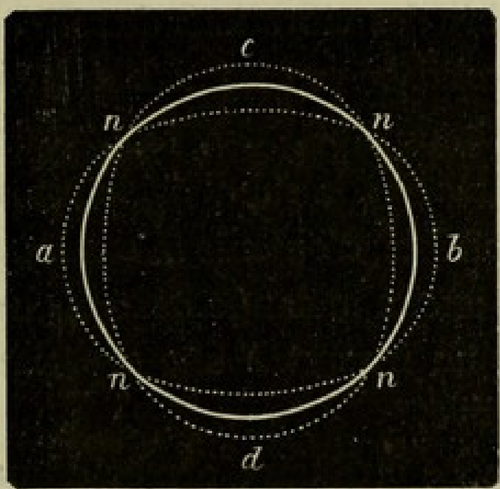
Fig. 67. Fig. 68. Fig. 69.



brations mis en évidence par les figures 57, 58 et 59. La poussière fine choisit, dans tous les cas, les points de vibrations les plus énergiques. On avait essayé plusieurs explications de ce fait, mais il était réservé à Faraday de lui assigner sa cause extrêmement simple. La poudre légère est saisie par les petits tourbillons d'air engendrés par les vibrations de la plaque ; elle ne peut pas échapper à l'action de ces petits cyclones dont les particules plus lourdes du sable se dégagent facilement. Par conséquent, lorsque le mouvement cesse, la poudre légère reste tassée aux points où la vibration avait son maximum d'énergie. Dans le vide, on n'observe plus rien de semblable; toutes les poudres légères ou pesantes s'accumulent le long des lignes nodales.

Les ventres et les nœuds des cloches sont analogues à ceux des plaques circulaires. Lorsqu'une cloche sonne sa note la plus grave, la coexistence des impulsions fait qu'elle se divise en quatre segments, séparés l'un de l'autre par quatre lignes nodales, qui vont du bord vers le sommet de la cloche. Le point où le battant frappe est toujours le milieu d'un segment vibrant; il en est ainsi du point diamétralement opposé. A 90 degrés de ces deux points, nous trouvons deux autres segments vibrants; tandis qu'à 45 degrés des mêmes points, à gauche et à droite, on rencontre les lignes nodales. Concevons que le cercle blanc nous représente la circonférence de la cloche à l'état de repos (*fig.* 70); quand

Fig. 70.



le battant frappera sur un quelconque des segments *a*, *c*, *b* ou *d*, le bord circulaire subira successivement les changements indiqués par les lignes ponctuées. A un instant donné, il est ovale ou elliptique, avec *ab* pour son plus grand diamètre; l'instant suivant, ce sera encore une ellipse, mais avec *cd* pour grand axe. Le passage d'une ovale à l'autre est précisément ce qui constitue de fait les vibrations de la cloche. Les quatre points n, n, n, n, où les ovales se coupent, sont les nœuds. De même que pour un disque, le nombre des vibrations exécutées par une cloche est directement proportionnel au carré de son épaisseur, et inversement proportionnel à son diamètre.

Comme un disque aussi, la cloche se divise d'elle-même en un nombre pair de segments vibrants, mais jamais en un nombre impair. En amortissant ou constituant à l'état de nœuds des points convenablement choisis, on peut la partager successivement en 6, 8, 10, 12 parties vibrantes. En commençant par la note fondamentale, les nombres de vibrations correspondant aux divisions respectives d'une cloche, comme dans le cas du disque, sont les suivants :

Nombres de divisions.	4, 6, 8, 10, 12.
Nombres dont les carrés ont entre eux les mêmes rapports que les nombres de vibrations. . . .	2, 3, 4, 5, 6.

Si donc le nombre des vibrations du son fondamental est de 40 par seconde, celui du son immédiatement au-dessus sera de 90; les suivants, de 160, 250, 360, etc. Quand la cloche est mince, sa tendance à la subdivision est si grande, qu'il est presque impossible d'obtenir le son fondamental parfaitement pur, sans aucun mélange des sons harmoniques.

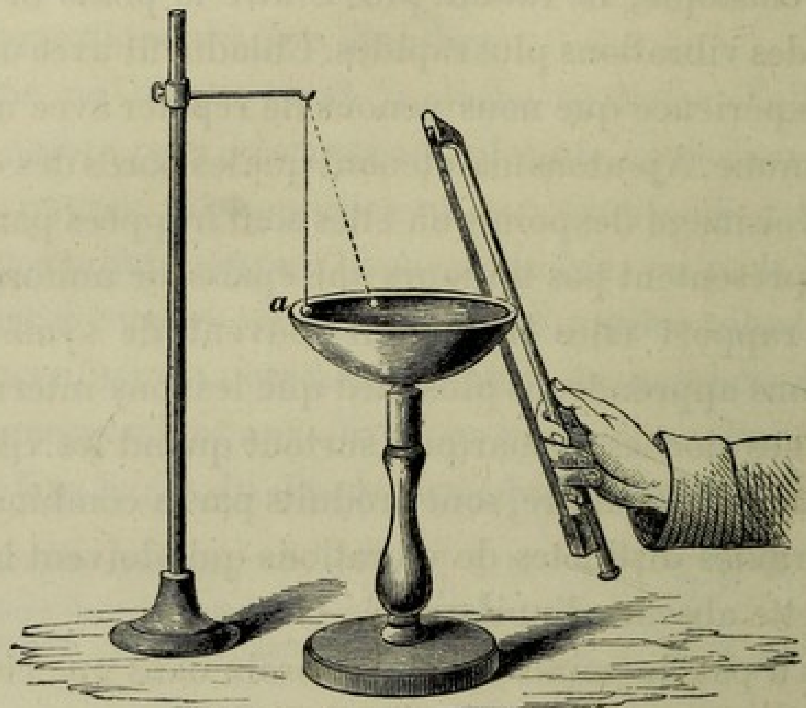
Arrêtons-nous un instant à une expérience de ménage, mais très-instructive.

Voici une cruche ordinaire armée d'une anse. Voulez-vous apprécier l'influence de l'anse sur le son rendu par le cruche. Attaquons le bord avec l'archet au point diamétralement opposé à l'anse. Faisons la même chose au point situé à 90 degrés de l'anse. Le ton de la note rendue est le même dans les deux cas. Dans les deux cas aussi, l'anse occupe le milieu d'un segment vibrant, qu'elle surcharge de son propre poids. Maintenant attaquons avec l'archet le point situé à 45 degrés de l'anse, la note est sensiblement plus élevée qu'auparavant. Dans cette dernière expérience, l'anse occupe la place d'un nœud ; elle n'est plus pour le segment vibrant une surcharge, et par conséquent la force élastique, ne luttant plus contre le poids de l'anse, produit des vibrations plus rapides. Chladni fit avec une tasse à thé l'expérience que nous venons de répéter avec une cruche commune. Ajoutons maintenant que les bords des cloches, dans le voisinage des points où elles sont frappées par le battant, ne présentent pas toujours une épaisseur uniforme ; que sous ce rapport elles manquent souvent de symétrie absolue ; nous apprendrons plus tard que les sons intermittents de certaines cloches, remarqués surtout quand les vibrations sont prêtes de s'éteindre, sont produits par la combinaison de deux périodes distinctes de vibrations qui doivent leur origine à cette absence d'uniformité.

Il n'y a pas de points en repos absolu dans une cloche vibrante, parce que les nœuds des sons harmoniques ne sont pas ceux du son fondamental. Mais il est facile de démontrer que, lorsque le son fondamental prédomine, les diverses parties du cercle frappé par le battant vibrent avec différents degrés d'intensité. Suspendons à un fil *a* (*fig.* 71) une petite boule de cire à cacheter, de sorte que dans sa position d'équilibre elle touche légèrement le bord intérieur de cette cloche renversée ou de ce timbre. Aussitôt que le timbre vibre, la balle de laque est repoussée et projetée. Mais sa projection est beaucoup plus violente quand elle pose contre un segment vibrant que lorsqu'elle est en contact avec un nœud. En appuyant la boule en ivoire d'un pendule assez court contre le grand bourdon de Westminster, on a constaté que le contact avec un ventre la projetait à 13 centimètres de distance, tandis que sous l'action d'un nœud il s'élançait à peine à 5 centimètres quand le battant frappait la cloche.

Si la *Grande Cloche* pouvait être renversée, le bord en haut, le sommet en bas, en la remplissant d'eau et la faisant

Fig. 71.



résonner on verrait la surface de l'eau se couvrir de magnifiques rides ou ondes. On produit des rides semblables avec des cloches plus petites, ou même lorsqu'on promène circulairement le doigt sur le bord d'un verre. Mais des rides si petites sont hors de portée avec les expériences que nous avons à faire. Voici un grand vase hémisphérique, qui émet une note grave très-franche. Remplissons-le d'eau et attaquons-le sur son bord avec un archet. Dès que l'archet frotte avec assez de vigueur, vous voyez l'eau s'élever sous forme de mousse composée de sphérules liquides aux centres des quatre segments vibrants. Essayons, pour les rendre visibles à tous, de projeter ces rides sonores. Faisons tomber sur l'eau tranquille un large faisceau de lumière électrique sous un angle convenable, et sur le trajet du rayon réfléchi dressons cette grande lentille convergente, qui projette sur l'écran l'image amplifiée de la surface liquide. Faisons maintenant agir l'archet, ou frottons avec le doigt sur le bord du verre. Vous entendez le son grave, et en même temps vous voyez les rides se traduire en musique visible par la forme harmonieuse qu'elles prennent sur les quatre segments vibrants de la surface liquide.

Si, au lieu d'eau, on emploie du bisulfure de carbone, les sphérules liquides, en raison du poids spécifique plus grand du sulfure, rebondissent avec une énergie beaucoup plus grande, et la mosaïque exquise de la surface se maintient plus longtemps. Mais l'effet est encore plus beau quand on fait usage de liquides volatiles plus légers. Vous connaissez l'expérience curieuse de Leidenfrost, qui découvrit le premier l'état sphéroïdal de l'eau. Vous savez qu'une goutte d'eau versée sur un bassin d'argent chauffé au rouge, au lieu de se réduire instantanément en vapeur, roule arrondie en globules sur sa propre vapeur. La même chose a lieu quand on laisse tomber une goutte d'éther à la surface de l'eau chaude; la goutte retient sa forme sphéroïdale. Remplissons une cloche de verre d'éther ou d'alcool, et un coup vif d'archet sur le bord du verre détachera de la surface des sphérules qui en retombant ne se mêleront pas avec le liquide, mais se grouperont à la surface sur les lignes nodales. L'échauffement du liquide, comme on devait s'y attendre, aide à la production de l'effet cherché. M. Melde, à qui nous devons cette brillante expérience, a représenté ce qui se produit quand la surface est divisée en quatre ou six segments vibrants (*fig.* 72 et 73). On obtient le même résultat avec un verre à vin mince rempli d'eau-de-vie, ou même d'eau quand il arrive que les sphérules sont défendues du contact par une enveloppe d'air.

Ici, le verre et le liquide qu'il contient vibrent ensemble;

et tout ce qui est de nature à rompre la parfaite continuité de la masse entière trouble l'effet sonore. Une simple fêlure

Fig. 72.

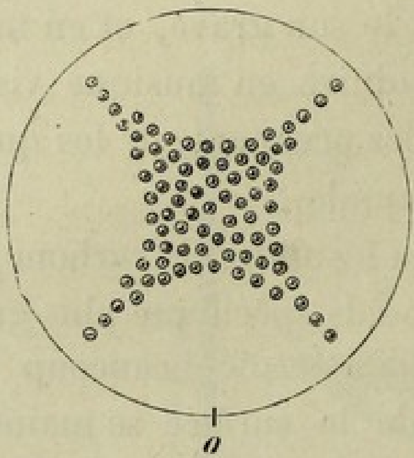
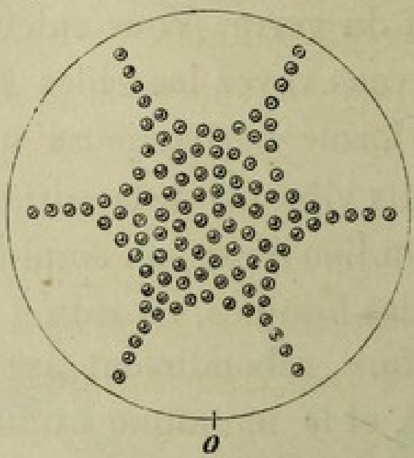
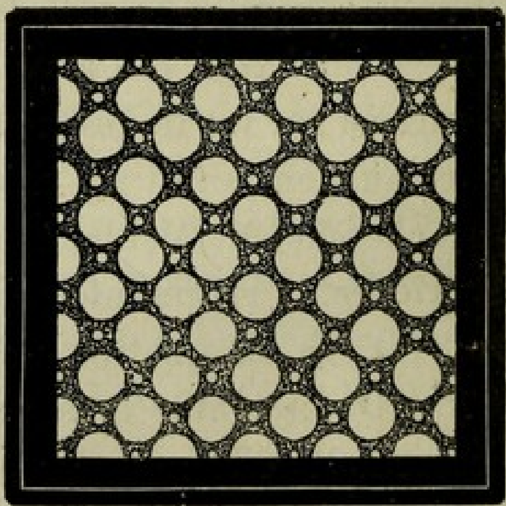


Fig. 73.



du verre, allant du bord au sommet, suffit pour éteindre sa sonorité. Une rupture quelconque dans la continuité du liquide produit le même effet. Pour le démontrer, plaçons dans ce verre une solution de carbonate de soude; frappons le verre ; il rendra un son musical très-clair. Mais ajoutons au liquide un peu d'acide tartrique ; il mousse, et le son musical est remplacé par un choc sec qui n'a plus rien d'agréable pour l'oreille. La même chose a lieu pour un verre rempli de champagne mousseux. A mesure que la mousse disparaît,

Fig. 74.



le pouvoir sonore revient; le liquide est de nouveau limpide, vous entendez le son musical comme auparavant.

Les vagues de la mer laissent leur empreinte à la surface du sable sur lequel elles ont passé. Or, M. Faraday a démontré que les ondes produites par les vibrations sonores sont aptes à réaliser le même effet. Il attachait une plaque de verre à une planche longue et flexible, il versait à la surface de la plaque une mince couche d'eau, et faisait vibrer la planche dont les frémissements donnaient naissance à de très-belles rides. Une couche mince de sable répandue sur la plaque était entraînée par l'eau, et dessinait sur la plaque des dessins très-réguliers, dont la figure 74 peut donner une idée.

RÉSUMÉ DE LA LEÇON IV.

Une verge fixée à ses deux bouts, et qu'on fait vibrer transversalement, se divise de la même manière qu'une corde animée de vibrations transversales.

Mais la succession des sons harmoniques n'est pas la même que celle de la corde ; car, tandis que la série des sons émis par la corde est exprimée par la suite naturelle des nombres 1, 2, 3, 4, 5, etc. La série des sons émis par la verge est exprimée par la suite des carrés des nombres impairs 3, 5, 7, 9, etc.

Une verge fixée par une de ses extrémités peut vibrer comme un tout, c'est-à-dire sur toute sa longueur sans division ; elle peut également se diviser en segments vibrants, séparés par des nœuds.

Dans ce cas la vitesse de vibration du son fondamental est à celle du premier harmonique comme 4 : 25, ou comme le carré de 2 est au carré de 5. A partir de la première division, les vitesses de vibration sont proportionnelles aux carrés des nombres impairs 3, 5, 7, 9, etc.

Avec des verges de différentes longueurs, le nombre des vibrations est inversement proportionnel au carré de la longueur de la verge.

Si l'on a attaché un globule de verre argenté intérieurement à l'extrémité libre d'une verge, et qu'on l'éclaire vivement, le point lumineux formé par réflexion décrit des courbes de différentes formes pendant que la verge vibre. Le kaléidophone de M. Wheatstone est ainsi construit.

Les sons du violon de fer et de la boîte de musique sont rendus par des verges ou des languettes fixées à une extrémité, libres à l'autre.

Une verge libre à ses deux bouts peut aussi devenir une source de vibrations sonores. Dans son mode de division le plus simple elle a deux nœuds, et les sons harmoniques successifs correspondent aux divisions par 3, 4, 5, 6,... nœuds.

Le claquebois, le violon de paille, l'harmonica de verre sont des instruments dont les sons sont les mêmes que ceux de verges ou de lames libres à leurs deux extrémités, et supportées par leurs nœuds.

Lorsqu'une barre droite, libre à ses deux extrémités, est recourbée graduellement dans sa partie centrale, les deux nœuds correspondants à son ton fondamental se rapprochent graduellement l'un de l'autre. La barre finit par prendre la forme d'un diapason qui, lorsqu'il donne sa note fondamentale, est divisé en trois segments vibrants, par deux nœuds situés près de sa base.

Il n'y a dans un diapason aucune division par trois nœuds.

Le second mode de division d'un diapason, celui qui correspond à son premier harmonique, donne un nœud sur chaque branche, et deux à la base de la fourche.

Le son fondamental d'un diapason est à son premier harmonique approximativement comme le carré de 2 est au carré de 5. Les vibrations du premier harmonique sont, en conséquence, à peu près 6 $\frac{1}{4}$ fois plus rapides que celles du son fondamental. A partir du premier harmonique les vitesses de vibration des harmoniques successifs sont comme les carrés des nombres impairs 3, 5, 7, 9, etc.

Nous devons à Chladni toutes les recherches expérimentales faites sur ces divers corps vibrants. Il fut amené à les entreprendre par la découverte de ce fait que, lorsque du sable est répandu sur une surface vibrante, il est chassé des segments vibrants de la surface et s'accumule sur les nœuds ou le long des lignes nodales.

Chladni comprit dans ses recherches des plaques de diverses formes. Une plaque carrée, par exemple, fixée en son centre, et à laquelle on fait rendre sa note fondamentale, se divise en quatre petits carrés par des lignes parallèles à ses côtés.

La même plaque peut se diviser en quatre parties vibrantes triangulaires, les lignes nodales coïncidant avec les diagonales. La note produite dans ce cas est une quinte au-dessus de la note fondamentale de la plaque.

La plaque est susceptible de subdivisions successives, et l'on peut obtenir des dessins de sable de la plus grande beauté. Les notes s'élèvent à mesure que les subdivisions deviennent plus nombreuses ou plus petites.

Ces dessins peuvent s'expliquer par la coexistence et la superposition des différents systèmes de vibration.

Lorsqu'une plaque circulaire, saisie à son centre, sonne sa note fondamentale, elle se divise en quatre parties vibrantes séparées par quatre rayons nodaux.

Les notes suivantes de la plaque correspondent à des divisions en six, en huit, en dix, en un nombre pair quelconque de secteurs vibrants ; les figures de sable prenant, dans ces divers cas, les formes variées et toujours élégantes de radiations stellaires.

Les vitesses de vibration correspondantes aux divisions d'un disque sont représentées par les carrés des nombres 2, 3, 4, 5, 6, etc. En d'autres termes, les vitesses de vibrations sont proportionnelles aux carrés des nombres indiquant en combien de secteurs le disque s'est divisé.

Lorsqu'une cloche donne sa note la plus basse, elle est divisée en quatre parties vibrantes, séparées par des lignes nodales, qui montent du cercle frappé par le battant vers le sommet.

Une cloche comporte les mêmes subdivisions qu'une plaque ; elle rend aussi comme une plaque circulaire les sons correspondants aux modes de subdivision.

LEÇON V.

Vibrations longitudinales des verges métalliques. — Vitesses relatives du son dans le cuivre et dans le fer. — Vibrations longitudinales des verges libres à l'une de leurs extrémités. — Des verges libres à leurs deux extrémités. — Divisions et sons harmoniques des verges qui vibrent longitudinalement. — Étude des vibrations des verges, au moyen de la lumière polarisée. — Détermination de la vitesse du son dans les solides. — Résonnance. — Vibrations des tuyaux fermés : leurs divisions et leurs sons harmoniques. — Rapports des sons des tuyaux fermés avec ceux des tuyaux ouverts. — Condition de la colonne d'air dans un tuyau d'orgue pendant la production du son. — Anches et instruments à anches. — Organe de la voix. — Sons harmoniques des cordes vocales. — Les sons voyelles. — Expériences de Kundt. — Nouvelle méthode pour déterminer la vitesse du son.

Jusqu'ici nous nous sommes exclusivement occupés des vibrations transversales, c'est-à-dire des vibrations qui s'exécutent perpendiculairement aux longueurs des cordes et des verges, ou aux surfaces des plaques et des cloches soumises à notre examen. Une corde peut vibrer également dans la direction de sa longueur ; mais ce qui lui donne le pouvoir de vibrer ainsi, ce n'est plus la tension déterminée par une cause extérieure, c'est la force élastique de ses propres molécules. Or, cette élasticité moléculaire est beaucoup plus grande que celle que nous pouvons développer par la tension de la corde, et il en résulte que les *vibrations longitudinales* d'une corde produisent des sons beaucoup plus aigus que ceux qui sont dus aux vibrations transversales. Ces vibrations longitudinales peuvent être produites par le frottement, dans une direction oblique, d'un archet de violon ; mais on les obtient plus aisément en frottant vivement la corde, suivant sa longueur, avec un morceau d'étoffe ou de cuir saupoudré de résine. Le frottement du doigt saupoudré de résine produit le même effet.

Pinçons le fil de notre monocorde en l'écartant et le lâchant; vous entendez le son produit par ses vibrations transversales. Maintenant frottons ce même fil avec un cuir saupoudré de colophane; nous entendons une note beaucoup plus aiguë que la précédente et qui est due aux vibrations longitudinales du fil. Voici un fort fil de fer, d'environ 6 mètres de longueur; une de ses extrémités est solidement attachée à un montant de bois immobile, tandis que l'extrémité opposée s'enroule sur une cheville fixée aussi solidement. On peut tourner la cheville au moyen d'une clef, et donner ainsi au fil la tension nécessaire pour faciliter l'action du frotteur. Entourons le fil de la main armée du cuir saupoudré de résine, et imprimons à la main un mouvement de va-et-vient ; un beau son musical, d'une grande vigueur, frappe immédiatement notre oreille. Serrons fortement le fil à son centre et frottons une de ses moitiés ; la note est maintenant l'octave de celle que nous entendions, la vitesse de vibration est doublée. Serrons le fil à un tiers de sa longueur et frottons le plus petit des deux segments, la note est la quinte au-dessus de l'octave. Serrons à un quart de sa longueur, et frottons ce quart ; la nouvelle note est la double octave de la première, ou le produit d'une vibration quatre fois plus rapide. Ainsi pour les vibrations longitudinales comme pour les vibrations transversales, le nombre des vibrations exécutées dans un temps donné est inversement proportionnel à la longueur du fil.

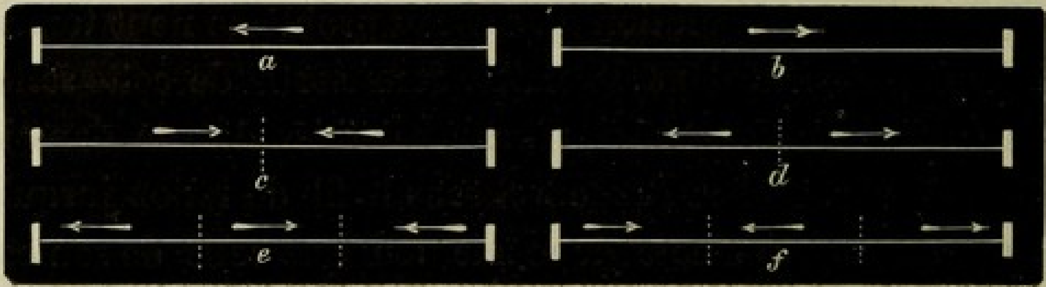
Et remarquez la prodigieuse puissance de ces sons lorsque le fil est frotté vigoureusement. Raccourcissons le segment frotté, la note s'élève; raccourcissons encore, le son devient si perçant, et en même temps si intense, qu'à peine on peut le supporter. Ce n'est pas le fil lui-même qui produit ce son intense ; c'est le montant de bois auquel les vibrations sont transmises par le fil. Et comme les vibrations du fil sont longitudinales, celles du montant de bois doivent être transversales, puisque sa surface est à angles droits avec le fil. Nous avons ici un excellent exemple de la conversion de vibrations longitudinales en vibrations transversales.

Enlevons le chevalet qui a servi à serrer le fil et faisons-le vibrer encore longitudinalement dans toute sa longueur. Pendant qu'il vibre, un aide tournera la clef et fera varier la tension du fil. Vous ne remarquez aucun changement dans le son rendu. Une fois que le fil est assez tendu pour relier pleinement les points d'attache, les vibrations longitudinales, différentes en cela des vibrations transversales, deviennent indépendantes de la tension. Voici près du fil de fer un fil de laiton, de même longueur et de même diamètre. Frottons-les tous les deux. Leurs sons ne sont pas identiques ; le son du fil de fer est considérablement plus élevé que le son du fil de laiton. D'où vient cette différence? Simplement de ce que la vitesse des pulsations sonores est plus grande dans le fer que dans le laiton. Dans les conditions actuelles le mouvement de va-et-vient des vibrations se fait d'un bout du fil à l'autre. A un instant donné, les pulsations du fil exercent une poussée contre le montant ; dans l'instant suivant, elles tirent à elles ce même montant ; et les tractions aussi bien que les poussées sont le résultat de pulsations qui se succèdent en sens contraires sur toute la longueur du fil. Le temps exigé par une pulsation pour parcourir tout le fil, dans un sens et *dans le sens opposé*, est la durée d'une vibration complète. Dans cette durée, le fil exerce une poussée et une traction sur le plateau de bois, à son point d'attache ; le plateau de bois imprime à l'air une vibration complète, et sous l'action de l'air la membrane du tympan s'infléchit une fois de dehors en dedans et une fois de dedans en dehors. De là il résulte manifestement que la vitesse de vibration, ou, en d'autres termes, le ton de la note, dépend de la rapidité avec laquelle les pulsations sonores sont transmises par le fil.

Et voici que la solution d'un beau problème nous tombe en quelque sorte dans la main. Sans sortir de cette salle, nous pouvons mesurer les vitesses relatives du son dans le laiton et dans le fer. Raccourcissons le fil de laiton jusqu'à ce qu'il donne une note de même ton que celle de son camarade, le fil de fer. Vous entendez les deux notes résonner à l'unisson. Cela prouve que le son parcourt dans le même temps 7 mètres de fer et 4 mètres de laiton. Le rapport de ces deux nombres est donc le rapport des vitesses respectives du son dans le fer et dans le laiton. Les deux longueurs sont à peu près comme 51:33; et en effet les vitesses du son dans ces deux métaux sont, en nombres ronds, de 5100 et 3300 mètres par seconde. La même méthode s'applique à d'autres métaux quelconques.

Lorsqu'un fil métallique vibre longitudinalement et donne sa note la plus basse, il n'y a absolument aucun nœud. Chaque pulsation, comme nous l'avons dit, parcourt successivement toute la longueur du fil dans les deux sens opposés. Mais ainsi qu'une corde qui vibre transversalement, il peut se diviser en segments vibrants ou ventres, séparés par des nœuds. En amortissant au milieu du fil, nous faisons de ce point un nœud. Alors, les pulsations courent des deux extrémités du fil, se rencontrent au centre, s'éloignent l'une de l'autre en rétrogradant, et reviennent aux extrémités, d'où elles partent de nouveau, en y subissant une nouvelle réflexion. La note émise par les deux segments du fil est l'octave de sa note fondamentale. La note immédiatement plus élevée est celle qu'on obtient par la division du fil en trois segments vibrants, séparés par deux nœuds. Le premier de ces trois modes de vibration est représenté (*fig.* 75) par *a* et *b*; le second, par *c* et *d*; le troisième, par *e* et *f*. Les nœuds sont

Fig. 75.

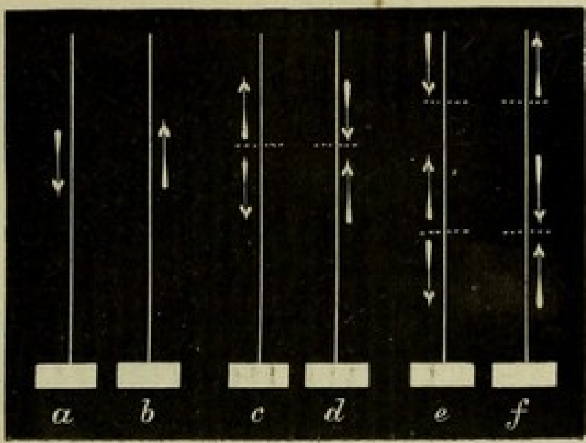


marqués par les lignes ponctuées transversales, et le sens de la marche des pulsations est indiqué dans chaque cas par des flèches. Les sons du fil, déterminés par les périodes de vibration, se succèdent dans l'ordre des nombres 1, 2, 3, 4, 5, etc., exactement comme dans le cas des vibrations transversales.

Une *verge* ou *barre* de bois ou de métal, dont les deux extrémités sont fixes et qui vibre longitudinalement, se divise de la même manière qu'un fil. La succession des sons est aussi la même dans les deux cas.

Les verges et les barres *dont une seule extrémité est fixe* sont également susceptibles de vibrations longitudinales. Une verge de bois poli ou de métal, fixée par un de ses bouts, dans un étau, émet une note musicale lorsqu'on la frotte suivant sa longueur avec les doigts saupoudrés de résine. Lorsqu'elle rend sa note la plus basse, elle s'allonge et se raccourcit tour à tour et très-rapidement. Dans ce cas, par conséquent, il n'y a dans la verge aucun nœud. Si l'on compare des verges de diverses longueurs, le ton de chaque note est en raison inverse de la longueur de la verge. Cette loi résulte nécessairement de ce fait, que la durée d'une vibration complète est le temps employé par une impulsion à parcourir deux fois la longueur de la verge. Le premier harmonique d'une verge fixée par un bout correspond à la division de la verge par un nœud situé au tiers de la longueur, à partir de l'extrémité libre. Le second harmonique correspond à la division par deux nœuds, dont le plus haut est situé à un cinquième de la longueur à partir de l'extrémité libre, le reste de tige étant divisé en deux parties égales. Dans la figure 76,

Fig. 76.

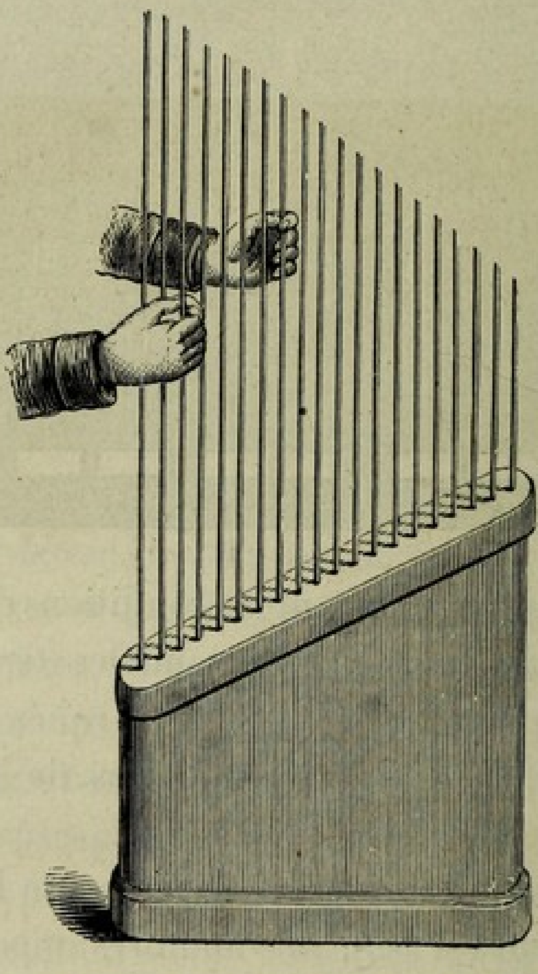


a et *b*, *c* et *d*, *e* et *f* représentent les conditions de la barre correspondantes à ces trois premiers modes de vibration. Les nœuds, comme précédemment, sont marqués par des lignes ponctuées ; les flèches indiquent le sens de la marche des pulsations alternatives.

La série des sons d'une verge fixée par un bout et vibrant longitudinalement est celle des nombres impairs, 1, 3, 5, 7, 9, etc. Il est facile de voir que cela doit être : car la durée des vibrations de *c* ou *d* est celle des vibrations du segment situé au-dessus de la ligne ponctuée ; et la longueur de ce segment étant le tiers de la longueur totale, ses vibrations doivent être trois fois aussi rapides que le seraient celles de la verge vibrant sans division sur toute sa longueur. La durée de chaque vibration en *e* ou *f* est aussi celle qui convient au segment supérieur, et comme ce segment est un cinquième de la longueur totale, ses vibrations doivent être cinq fois aussi rapides que celles qui auraient lieu sur toute l'étendue de cette longueur. L'ordre des sons suit donc la loi des nombres impairs.

Voici (*fig.* 77) un instrument de musique dont les notes

Fig. 77.

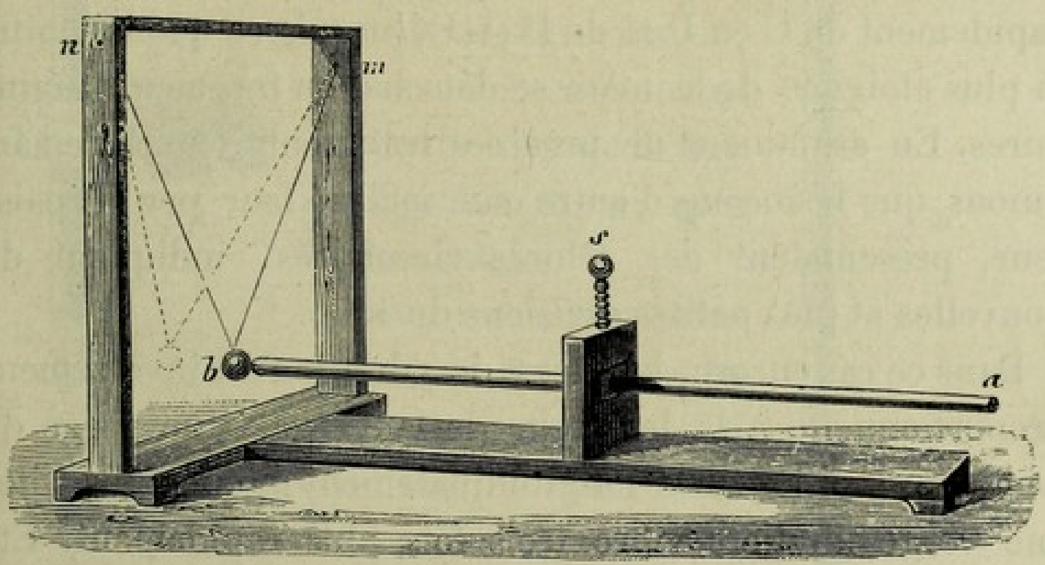


sont dues aux vibrations longitudinales de baguettes de sapin de différentes longueurs. En passant successivement le long de ces baguettes les doigts saupoudrés de résine, on en tire une série de notes de tons variables. Mais les doigts d'un praticien habile pourraient seuls faire apprécier les qualités de cet instrument primitif.

Les verges *libres à leurs deux extrémités* ont aussi la propriété de vibrer longitudinalement et d'émettre alors des sons musicaux. L'examen de cette partie de notre sujet va nous conduire à des résultats d'une extrême importance.

Saisissant d'une main un long tube de verre par son milieu, passons avec l'autre main une étoffe mouillée sur une des deux moitiés : il en résulte un beau son musical. Une baguette de verre compacte de même longueur rendrait la même note. Le milieu du tube est un nœud; chacune des deux moitiés s'allonge et se raccourcit alternativement, par une suite de mouvements très-rapides. M. Koënig, l'habile acousticien de Paris, a construit un appareil qui met en évidence ce mode d'action. Une barre de laiton *ab* est serrée en son milieu par une vis *s* (*fig.* 78); et une bille d'i-

Fig. 78



voire, suspendue par deux cordons aux points fixes *m* et *n* d'un montant en bois, appuie contre l'extrémité *b* dé la barre. Frottons doucement du côté de *a* avec un morceau de cuir saupoudré de résine, et animons ainsi la barre d'un mouvement de vibrations longitudinales. Le centre *s* est un nœud; mais la bille d'ivoire est dans un état de malaise visible, que dénotent les frémissements de l'extrémité *b*. Frottons plus vivement, la bille frémit à son tour; maintenant la vibration est si intense qu'elle est repoussée violemment chaque fois qu'elle arrive à toucher la barre.

Lorsque, avec l'enveloppe mouillée, on frotte le tube de verre, on peut voir la couche liquide que l'enveloppe laisse après elle former une série d'anneaux étroits autour de la surface. Or, cette espèce de tremblement du liquide est dû à une agitation analogue du verre qu'il recouvre, et il est possible d'augmenter à tel point l'intensité de la vibration que le verre se rompe en morceaux. Savart fut le premier à constater ce fait. Deux fois dans cette enceinte, nous avons répété son expérience, en sacrifiant chaque fois un beau tube de verre de 2 mètres de longueur et de 5 centimètres de diamètre. Après l'avoir saisi par son centre C (*fig.* 79), nous le frottions d'une main vigoureuse, allant rapidement de C en D et de D en C, jusqu'à ce que la moitié la plus éloignée de la main se détachât en fragments annulaires. En examinant de près ces fragments, nous remarquions que beaucoup d'entre eux, malgré leur peu d'épaisseur, présentaient des fêlures circulaires, indiquant de nouvelles et plus petites divisions du tube.

Dans ce cas encore, la vitesse de vibration est inversement proportionnelle à la longueur de la verge. Une verge de longueur moitié vibre longitudinalement moitié plus vite, une verge un tiers vibre trois fois plus rapidement. Et, en effet, la durée d'une vibration complète étant l'espace de temps employé par une pulsation pour parcourir successivement la longueur de la verge dans les deux sens opposés, et cet intervalle de temps étant proportionnel à la longueur, il est clair que la vitesse de vibration doit être en raison inverse de cette même longueur.

Cette division d'une verge libre à ses deux bouts par un nœud au milieu est celle qui donne le son le plus grave que puissent produire ses vibrations longitudinales. Mais, comme dans tous les cas examinés jusqu'ici, la verge est susceptible de subdivisions nouvelles. Tenons cette longue tige de verre *aë* (*fig.* 80) par le point *b* situé à égale distance de son milieu et de l'une de ses extrémités, et frottons la petite section *ab* avec un drap mouillé. Le point *b* devient un nœud, et un second nœud *d* se forme à la même distance de l'extrémité opposée. La tige se trouve ainsi divisée en trois parties vibrantes, savoir : le segment central tout entier *bd*, et deux demi-segments *ab*, *de*. Le son correspondant à cette division de la tige est l'octave de sa note fondamentale.

Fig. 79.

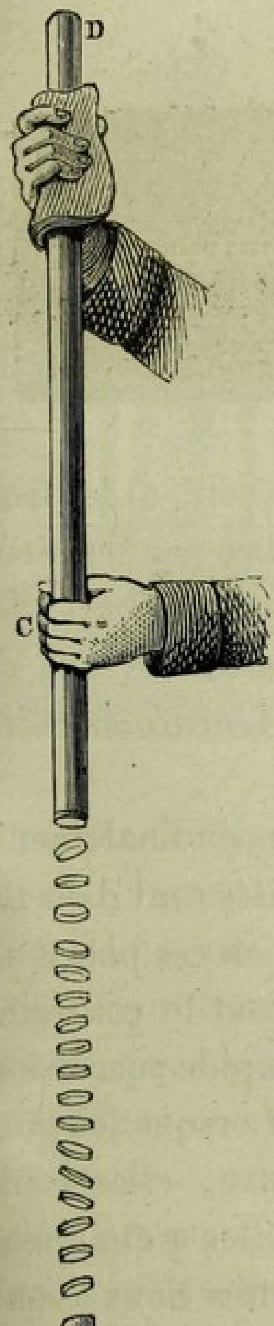
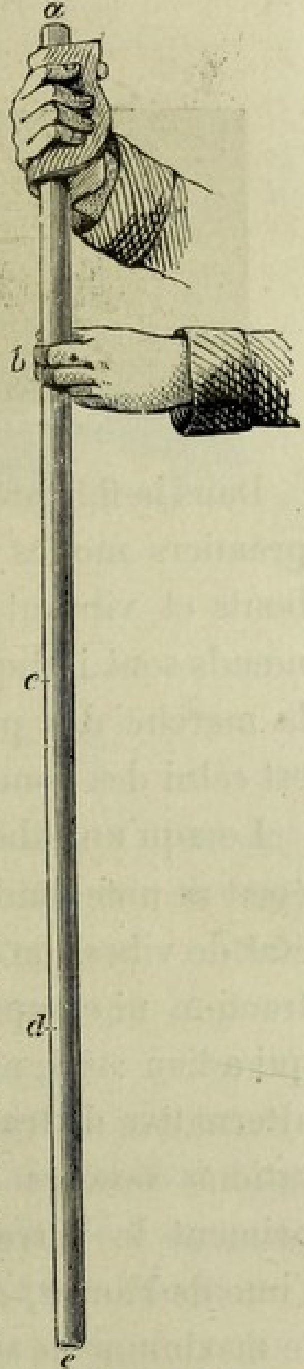
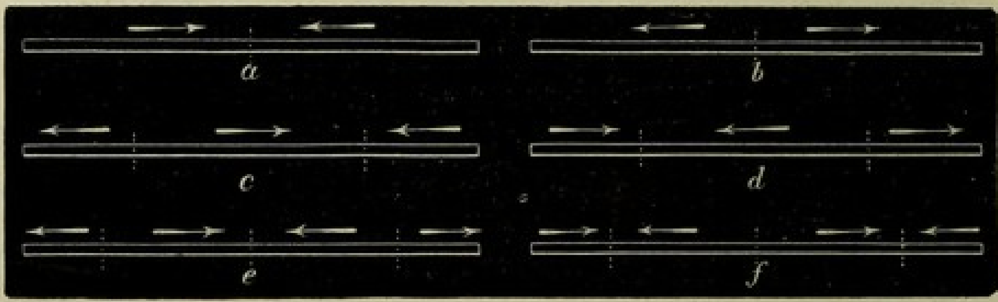


Fig. 80.



Vous avez maintenant un moyen de mettre en présence, pour ainsi dire face à face, deux de nos affirmations, et de vérifier si elles se contredisent ou s'accordent entre elles. Car, si le second mode de division que nous venons de décrire donne l'octave de la note fondamentale, et si une verge de demi-longueur donne cette même octave, il faudra que la verge de longueur entière, saisie en un point situé au quart de cette longueur à partir d'une extrémité, donne la même note que la verge de demi-longueur saisie par son milieu. Pendant que nous ferons vibrer la verge entière, un aide se chargera de faire vibrer l'autre. Vous entendez les deux sons, leur ton est parfaitement le même.

Fig. 81.

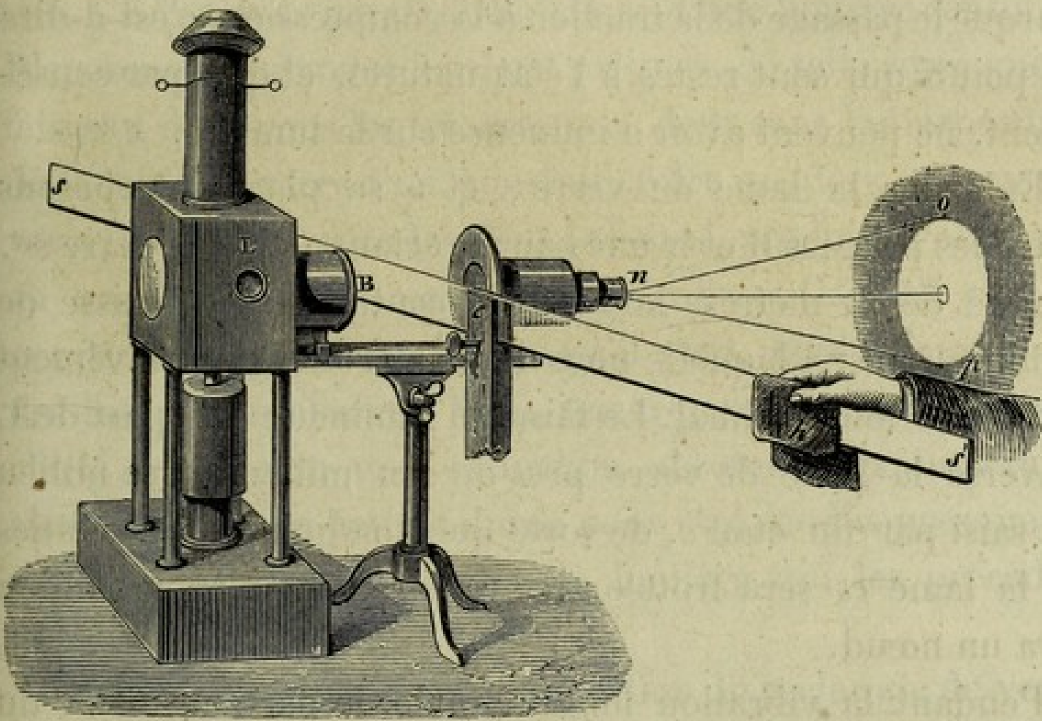


Dans la figure 81, *a* et *b*, *c* et *d*, *e* et *f* représentent les trois premiers modes de division d'une verge libre par ses deux bouts et vibrant longitudinalement. Comme toujours, les nœuds sont indiqués par des lignes ponctuées, et le sens de la marche des pulsations par des flèches. L'ordre des sons est celui des nombres 1, 2, 3, 4, etc.

Lorsqu'un tube, ou une verge, vibrant longitudinalement, émet sa note fondamentale, ses deux extrémités sont dans un état de vibration libre, le verre n'éprouvant en ces points ni traction ni compression. Au milieu, c'est tout le contraire qui a lieu : ici, nulle vibration, mais une rapide succession alternative de tractions et de compressions. Lorsque les pulsations sonores arrivent ensemble au centre, elles compriment le verre ; elles l'étirent, quand elles s'éloignent l'une de l'autre. Ainsi, tandis qu'aux extrémités nous avons le maximum de vibration, mais sans aucun changement de densité, au milieu, nous avons la variation maximum de densité, mais sans vibrations.

Voici que nous avons préparé les voies à une magnifique expérience qui fut faite par Biot, il y a un grand nombre d'années, mais que nous allons reproduire dans des proportions qu'on ne lui a pas encore données. Envoyons le faisceau lumineux de notre lampe électrique L (*fig.* 82) à travers

Fig. 82.



un prisme B de spath bi-réfringent, et produisons ainsi un rayon de lumière polarisée. Ce rayon rencontre un second prisme de spath *n* ; mais bien que les deux prismes soient parfaitement transparents, la lumière qui a traversé le premier ne peut plus traverser le second. Et ce que je veux vous faire voir, c'est que, si on place un morceau de verre entre les deux prismes, et qu'on lui fasse subir une traction ou une pression, la lumière deviendra capable de traverser le système des deux prismes. Nous opérons avec une lame de verre de forme rectangulaire, longue de quinze centimètres. Dans son état naturel, vous voyez qu'elle ne produit aucun effet ; bien qu'elle soit placée entre les deux prismes, sur la route de la lumière, l'écran reste obscur. Avec la seule force des doigts, j'infléchis la lame de verre, constituant ainsi une moitié de sa substance dans un état de dilatation, l'autre moitié dans un état de compression, et voici que vous voyez se produire sur l'écran l'image lumineuse de la lame. Vous remarquez toutefois une bande obscure le long de la partie mitoyenne de l'image : cette bande marque le passage de la traction à la compression, c'est-à-dire les points qui sont restés à l'état naturel, et qui, par conséquent, ne peuvent avoir d'influence sur la lumière.

Enlevons la lame de verre, et à sa place interposons entre les prismes B et *n* une bande rectangulaire de verre *ss'*, longue de 2 mètres, large de 5 centimètres, épaisse de 8 millimètres, à laquelle nous imprimerons un mouvement vibratoire longitudinal. Le faisceau lumineux qui part de L traverse la lame de verre près de son milieu, et ce milieu est saisi par un étau *c*, de sorte que lorsqu'une des moitiés de la lame *cs* sera frottée avec un drap mouillé, le milieu sera un nœud.

Pendant la vibration longitudinale, la partie centrale du verre est tour à tour étirée et comprimée, ainsi que nous l'avons expliqué ; et cette succession de traction et de compression communique à la masse du verre une structure qui fait sortir la lumière de la condition dont dépendait son extinction par le second prisme *n*. Soyez attentifs à l'expérience. L'écran est entièrement obscur : on passe vivement le drap mouillé sur le verre ; vous entendez un son, et au même instant, vous voyez paraître sur l'écran un disque éclatant de lumière d'un mètre de diamètre. La vibration est suspendue, aussitôt le disque lumineux s'évanouit, pour briller de nouveau à chaque passage du drap mouillé sur le verre.

La lumière de ce disque nous semble continue, mais elle est réellement intermittente, car le verre n'est perméable aux rayons lumineux que lorsqu'il subit les efforts de traction ou de compression. Dans le passage de la traction à la compression, il y a un instant où le verre a repris son état naturel, et si cet état se continuait, l'écran deviendrait obscur. Mais les impressions lumineuses, produites par la traction ou la compression, persistent sur la rétine beaucoup plus longtemps qu'il ne faut pour empêcher de saisir les intervalles d'obscurité. L'écran nous paraît donc éclairé d'une lumière continue. Disposons maintenant les deux prismes, de telle sorte que le faisceau de rayons les traverse tous deux sans l'interposition de la lame de verre : on pourrait croire qu'alors la lame de verre, replacée entre les deux prismes, produira l'obscurité au moment où elle commencera à vibrer. Ce n'est pas cependant ce qui arrive, bien qu'il y ait, sans aucun doute, des intervalles obscurs. Vous remarquez une diminution de clarté, mais non une extinction absolue. Les intervalles obscurs ont assez peu de durée pour être rendus presque insensibles par les intervalles de lumière qui les précèdent et les suivent.

Changeons actuellement la position du rectangle de verre, et plaçons-le de manière que les rayons de lumière polarisée le traversent dans le voisinage de l'une de ses extrémités *s*. Ici, les vibrations longitudinales n'ont plus aucune influence sur la marche des rayons dans le second prisme. Voici donc qu'avec l'aide de la lmmière polarisée, nous démontrons que le centre du verre, où la vibration est nulle, supporte des actions alternatives de traction et de compression, tandis que ses extrémités, où la vibration a son maximum, ne supportent ni l'une ni l'autre [1].

Jusqu'ici nous avons opéré presque exclusivement sur des verges ou des tubes de verre ; voici des verges de bois et de métal capables également de rendre des sons musicaux en vibrant longitudinalement. Mais cette fois le frotteur employé, au lieu d'être un drap mouillé, sera un morceau de cuir sur lequel on a répandu de la poudre de colo-

[1] Cette expérience réussit bien avec un tube de verre.

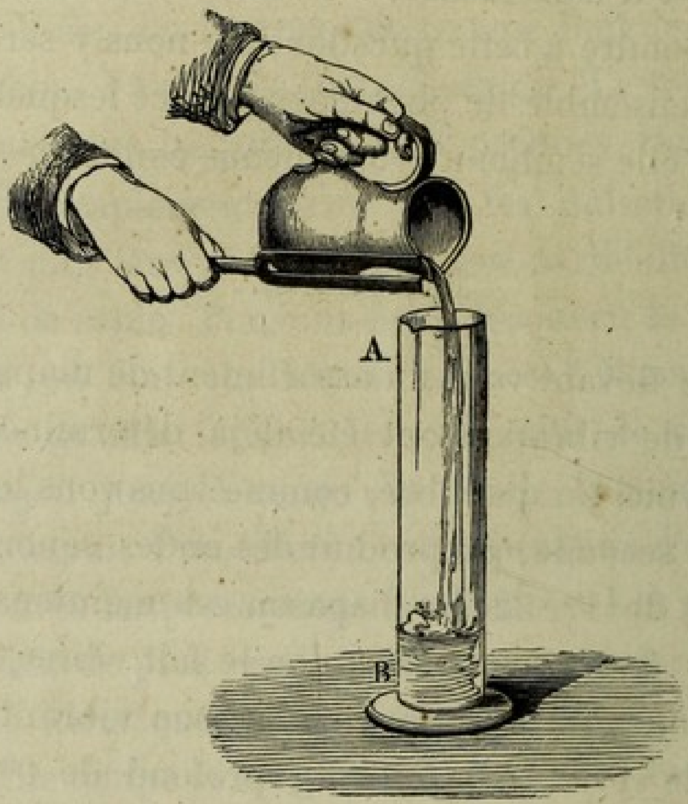
phane. Les doigts imprégnés de cette poudre font aussi chanter les verges. Les modes de vibration sont toujours ceux qui ont été déjà indiqués, mais le ton du son et la vitesse des impulsions sonores varient avec la nature de la verge. Voici deux verges de même longueur, l'une de bois de sapin, l'autre de bois d'acajou. Le ton du second est beaucoup plus bas que celui du premier. Pourquoi cette différence? Simplement parce que les pulsations sonores parcourent plus lentement cette espèce particulière d'acajou que le bois de sapin. Pouvons-nous découvrir le rapport des vitesses du son dans ces deux substances? Nous le pouvons avec la plus grande facilité. Il nous suffit de raccourcir la verge d'acajou jusqu'à ce qu'elle rende la même note que la verge de sapin. Procédons à cette opération d'une manière graduelle, avec les précautions nécessaires. Les notes qui se rapprochaient de plus en plus dans les premiers essais sont maintenant identiques. Les pulsations du son parcourent dans le même temps la verge d'acajou de 110 centimètres et la verge de sapin de 180 centimètres. Ces nombres représentent donc les vitesses relatives du son dans les deux substances.

Certains moyens de recherches, dont j'ai dû me borner à vous dire deux mots dans mes premières conférences, se représentent ici naturellement. Lorsque, dans notre première leçon, nous parlions de la vitesse du son dans l'air, divers moyens de déterminer cette vitesse se sont offerts sans doute à vos esprits, parce que vous aviez des milliers de kilomètres à votre disposition. Mais comment mesurer la vitesse du son dans le bois, dans les métaux, dans des corps où il ne peut plus être question de semblables distances? On y parvient de la manière très-simple qui vient d'être indiquée : des notes qu'elles émettent, quand elles sont convenablement préparées ou disposées, nous pourrons conclure avec certitude les rapports des vitesses relatives du son à travers les différentes substances solides; puis en déterminant le rapport de l'une de ces vitesses à la vitesse du son dans l'air, nous aurons tous les éléments nécessaires pour la formation d'un tableau des vitesses absolues. Mais comment l'air entrera-t-il dans la série ? Nous serons bientôt en mesure de répondre à cette question, car nous y serons ramenés par un ensemble de phénomènes avec lesquels, au premier abord, elle semble n'avoir aucune connexité.

RÉSONNANCE

Vous avez devant vous un assortiment de diapasons dont les vitesses de vibration ont été déjà déterminées avec la sirène. En voici un qui vibre, comme vous vous le rappelez, 256 fois par seconde, et produit des ondes sonores dont la longueur est de $1^m, 32$. Le diapason est maintenant séparé de sa caisse, de sorte que lorsqu'on le fait vibrer, vous l'entendez à peine. Nous tenons ce diapason vibrant au-dessus de ce vase de verre, AB (*fig.* 83), profond de $0^m, 45$, sans que le son qu'il rend devienne plus sensible à l'oreille. Le laissant dans cette position, versons de l'eau dans le vase, tout doucement et avec le moins de bruit possible. A mesure que l'eau s'élève dans le vase, la colonne d'air située au-dessus du diapason devient plus courte, en même temps, le son augmente d'intensité; et à l'instant où l'eau a atteint une certaine hauteur, le son retentit avec une force extraordinaire. On continue à verser de l'eau, et le son s'affaiblit graduellement jusqu'à ce qu'il devienne aussi insensible qu'au début de l'expérience. En retirant de l'eau du vase et procédant par tâtonnements minutieux, nous retrouvons le point où le son était devenu très-intense. Cette expérience nous apprend qu'il est une longueur déterminée de colonne d'air qui renforce à un plus haut degré que toute autre longueur le son du diapason placé au-dessus d'elle. Ce renforcement du son a reçu le nom de *résonnance*.

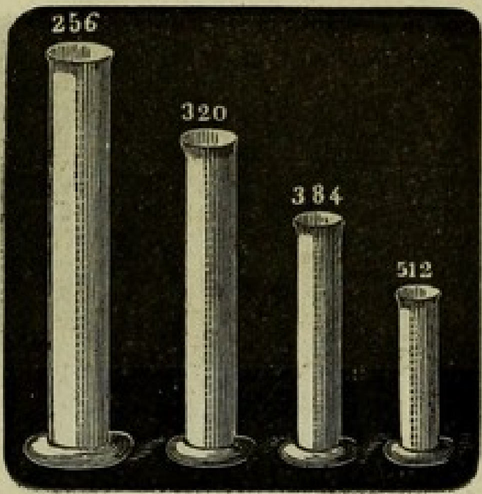
Fig. 83.



Répétons l'opération sur les trois autres diapasons de la série, nous trouverons pour chacun une colonne d'air qui donne le maximum de résonnance. Ces colonnes sont de différentes longueurs, elles deviennent plus courtes à mesure que la vibration devient plus rapide. La figure 84 représente les quatre vases résonnants, et au-dessus de chacun est indiqué le nombre de vibrations pour lequel a lieu sa résonnance maximum.

Mais pourquoi la hauteur des vases va-t-elle en diminuant, et quelle est la signification physique de ce merveilleux phénomène? Un plus grand volume de son entendu en chaque point de cette salle ne peut être que le résultat d'une plus grande quantité de mouvement communiqué à l'air qui la remplit. Dans quelles conditions le diapason peut-il porter à son maximum cette quantité de mouvement? Pour résoudre cette question, nous devons

Fig. 84.



nous rappeler ce que nous savons du rapport du mouvement du diapason au mouvement des ondes sonores de l'air, produites par ses vibrations. Supposons que ce diapason, dont le nombre de vibrations est de 256 par seconde, oscille entre les points *a* et *b* (*fig.* 85). Dans son mouvement de *a* à *b*, la branche engendre une demi-onde sonore, et, puisque la longueur de l'onde totale est de 1^{m}, 32, son extrémité antérieure a atteint le point C, à 0^{m}, 66 de la branche. L'espace parcouru par l'onde est donc énormément plus grand que celui qu'a parcouru la branche dans le même temps. Dans ce cas, en effet, la distance de *a* à *b* est à peine d'un millimètre, et pendant le temps que la branche a mis à franchir cette distance, l'onde sonore a franchi un intervalle de 66 centimètres. Avec des diapasons d'un ton moins élevé, la différence serait encore plus grande.

La question à résoudre maintenant est celle de savoir quelle est, pour ce diapason, la longueur de la colonne d'air qui donne la plus forte résonnance. Par des mesures directes prises avec une règle de 100 centimètres, nous trouvons que cette longueur est de 33 centimètres. Mais la longueur de l'onde totale émise par le diapason est de 132 centimètres;

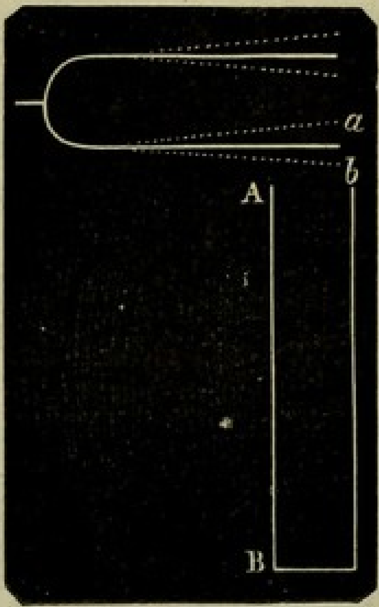
Fig. 85.

donc, *la longueur de la colonne d'air résonnante est le quart de la longueur de l'onde émise par le diapason.* Cette règle est générale, et nous pourrions la vérifier sur d'autres diapasons quelconques.

Concevons par la pensée que la branche oscillant entre les limites *a* et *b* soit placée au-dessus du vase résonnant AB (*fig.* 86). Pendant le temps qu'elle met à aller de *a* à *b*, la condensation qu'elle produit dans l'air court jusqu'au fond du vase ; elle y est réfléchie, et comme le chemin qu'elle a à parcourir dans le vase, aller et retour, est de 66 centimètres, l'onde réfléchie atteindra la branche au moment où elle se dispose à revenir de *b* à *a*. La dilatation de l'onde est l'effet de ce retour de *b* à *a*. Cette dilatation va aussi courir jusqu'au fond du vase où elle sera réfléchie, et reviendra à la branche juste au moment où elle atteint elle-même le point *a*, extrémité de son excursion rétrograde. Il résulte clairement de cette analyse que les vibrations du diapason sont parfaitement synchrones avec les vibrations de la colonne d'air AB, et qu'en vertu de ce synchronisme, le mouvement s'accumule dans le cylindre, d'où il se répand dans cette salle, et produit ainsi un renforcement de son considérable.

Si, dans un de ces vases, nous remplaçons l'air par un gaz d'élasticité différente, nous trouverons que la longueur

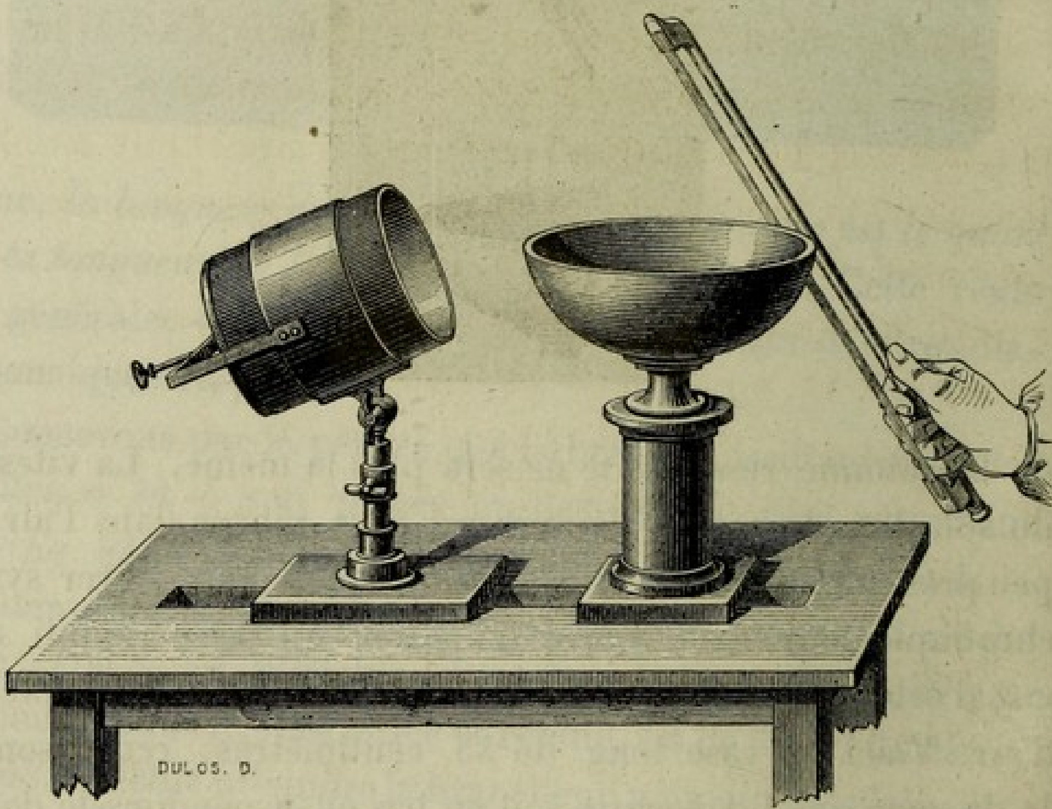
Fig. 86.



de la colonne résonnante ne sera plus la même. La vitesse du son dans le gaz d'éclairage est à sa vitesse dans l'air à peu près comme 8 est à 5. Il s'ensuit que, pour vibrer synchroniquement avec notre diapason, un vase rempli de gaz d'éclairage devrait être plus profond qu'un vase plein d'air. Voici un vase long de 45 centimètres; renversons-le de sorte que l'ouverture soit en bas et suspendons-le dans cette position au-dessus d'un bec de gaz actuellement fermé. Excitons notre diapason et tenons-le à l'orifice du vase : le son qu'il rend est à peine perceptible. Le vase, quand il est plein d'air, est trop long de 12 centimètres pour renforcer le diapason. Maintenant, ouvrons le robinet du bec; à mesure que le gaz monte dans le vase, la note musicale acquiert plus de volume, et nous constatons tout d'abord que, pour ce gaz plus élastique, la profondeur de 45 centimètres n'est pas trop grande. De fait, elle n'est même pas assez grande, car si nous laissons entrer trop de gaz, la résonnance diminue. Remettons subitement le cylindre dans sa position droite, en tenant toujours le diapason devant l'ouverture : le gaz s'échappe, et lorsque le mélange se trouve ramené aux proportions convenables, le son a repris toute sa force[1].

Nous sommes redevables à Savart du bel effet de résonnance que nous allons reproduire. Vous voyez ce large tim-

Fig. 87.



bre (*fig.* 87), qui vibre fortement sous l'action de l'archet frotté de colophane que nous passons sur son bord. Le son qui en résulte est pur, mais il n'est pas fort. Prenons ce large tube, et approchons son ouverture de l'un des segments vibrants du timbre : le son s'enfle et finit par devenir un véritable rugissement ; c'est une note d'une prodigieuse puissance, mais toujours pleine, agréable et musicale. Selon qu'on éloigne ou qu'on rapproche le tube, le son faiblit ou

[1] Le gaz s'échappe de la jarre avec une vitesse trop grande qui nuit à l'effet de l'expérience, et par cette raison le gaz hydrogène pur est préférable au gaz de houille.

se renforce d'une façon tout à fait surprenante. Laissons-le s'éteindre jusqu'à ce que le timbre laissé à lui-même ait pleinement cessé de se faire entendre; faisons avancer de nouveau le tube, et le son, qui il y a un instant n'était plus entendu même des personnes les plus voisines, retentit actuellement dans toute la salle. Prenons maintenant un second tube que l'on puisse allonger ou raccourcir comme le corps d'un télescope, mais différent du précédent en ce qu'il est ouvert par les deux bouts. Plaçons un de ses orifices près du timbre vibrant; la résonnance est faible. Allongeons-le en tirant la portion mobile, et quand nous aurons atteint une certaine longueur, le son s'enflera et reprendra toute la puissance que nous avons constatée tout à l'heure. Si nous allongeons encore le tube, la résonnance diminue comme elle avait augmenté. Et, prenez note de ce fait qui vous sera bientôt expliqué, que, pour le tube ouvert aux deux bouts, la longueur correspondante à la résonnance maximum est double de celle du tube ouvert à un seul bout.

Lorsque, dans la troisième leçon, en manœuvrant avec la main le long tube de caoutchouc, nous constations que les impulsions successives devaient être convenablement rhythmées pour produire les divers segments vibrants, nous sentions que la force musculaire développée, dès que les impulsions étaient convenablement espacées, était plus grande que lorsqu'elles se suivaient irrégulièrement. On peut observer un fait analogue avec un verre à moitié rempli d'eau, qu'on tient à la main. Essayez de mouvoir le verre à droite et à gauche, en parfait accord avec les oscillations périodiques de l'eau dans le verre, et lorsque vous serez parvenu à établir le synchronisme, vous sentirez que votre main aura à faire un effort plus grand, comme si le poids de l'eau avait augmenté. Il en est ainsi de notre diapason : lorsque ses impulsions sont synchrones à celles de la colonne d'air contenue dans le vase, il doit faire plus de travail que lorsqu'elles ne le sont pas. Par conséquent, le diapason reviendra plus vite au repos lorsqu'il sera placé sur le vase résonnant, que lorsqu'il vibre librement dans l'air, ou que le vase à l'orifice duquel il est placé n'a pas la profondeur qu'exige le synchronisme des vibrations[1].

En réfléchissant sur ce que déjà vous avez appris, vous résoudrez sans difficulté, j'en suis persuadé, ce beau problème : — Étant donnés un diapason et une sirène, déterminer la vitesse du son dans l'air. Pour le résoudre, en effet, il ne peut vous manquer que ce genre d'habileté que donne la pratique des expériences. Vous chercherez d'abord à déterminer au moyen de la sirène le nombre des vibrations de votre diapason par seconde. Ensuite, vous mesurerez la longueur de la colonne d'air qui résonne à l'unisson du diapason. Cette longueur, quadruplée, sera approximativement la longueur de l'onde sonore, et la longueur d'onde, multipliée par le nombre des vibrations en une seconde, vous donnera la vitesse demandée. C'est ainsi que, sans sortir de votre chambre, vous pourrez résoudre cet important problème. Mais poursuivons notre marche en avant, s'il vous plaît, et continuons-la toujours, en faisant le terrain solide sous chacun de nos pas.

TUYAUX D'ORGUES

Devant nous sont placés deux vases résonnants, et nous avons dans les mains deux diapasons. Nous les excitons l'un et l'autre, et nous les tenons tous deux au-dessus du premier vase. Un seul des deux se fait entendre. Nous les por-

[1] Il ne se convertit en son qu'une très-petite fraction du mouvement du diapason. Le reste est employé à vaincre le frottement intérieur des molécules. En d'autres termes, presque tout le mouvement se convertit en chaleur.

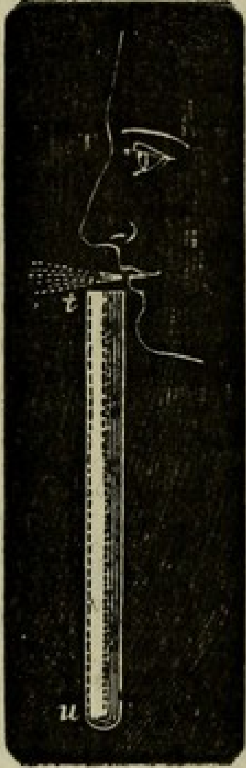
tons sur le second vase, c'est l'autre maintenant qui se fait entendre. Chaque vase choisit, pour en renforcer le son, celui des deux diapasons qui vibre synchroniquement avec lui. Au lieu de deux diapasons, nous pourrions en tenir deux douzaines au-dessus de l'un ou l'autre de ces vases : dans le pêle-mêle des pulsations ainsi engendrées, le vase saura toujours choisir et renforcera celles qui correspondent à ses périodes de vibration.

Prenons maintenant ce vase dans la main, élevons-le au niveau de nos lèvres, et soufflons transversalement à son ouverture, ou, ce qui vaut mieux, parce que le vase est trop grand pour l'expérience, soufflons transversalement à l'ouverture du tube de verre *tu* (*fig.* 88), de même longueur que le vase, et de 18 millimètres de diamètre. Nous déterminons ainsi un état de frémissement de l'air ; nous engendrons une série de pulsations partant de l'orifice du tube : quel en sera le résultat? Le tube choisit dans ce frémissement complexe celle des pulsations qui lui est synchrone, et l'élève à la dignité de son musical. Le son que vous percevez est précisément celui qu'on obtient en plaçant au-dessus du tube le diapason qui lui convient. Dans le cas actuel, la colonne d'air au sein du tube a créé virtuellement son propre diapason ; car, par la réaction de ses impulsions sur la couche d'air sortie de nos lèvres, le tube a déterminé cette couche d'air à vibrer synchroniquement avec lui, et à faire ainsi l'office d'un véritable diapason.

Passons à nos autres diapasons et choisissons pour chacun d'eux son tube résonnant. Dans chaque cas, en soufflant à travers l'extrémité ouverte, nous produisons un son de même ton que celui qu'on obtient en tenant le diapason correspondant au-dessus de cette même extrémité.

Si l'on compare entre eux différents tubes, on trouve que la vitesse de vibration est inversement proportionnelle à la longueur du tube. Voici trois tubes dont les longueurs sont 15, 30 et 60 centimètres. Nous soufflons doucement en tra-

Fig. 88.

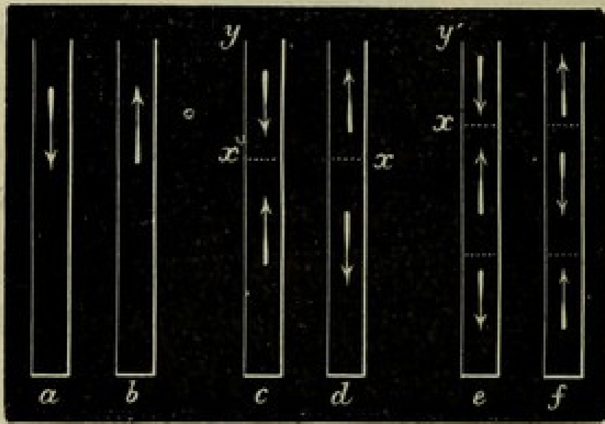


vers de l'orifice du plus long, et nous lui faisons produire sa note fondamentale; faisons la même chose pour le tube de 30 centimètres, et nous trouverons que sa note est l'octave de celle qu'a donnée le tube de 60 centimètres. Répétons l'opération pour le tube de 15 centimètres, sa note est pareillement l'octave de celle qu'a donnée la longueur de 30 centimètres. On comprend sans peine qu'il doit en être ainsi : car, la vitesse de vibration dépendant de la distance que doit parcourir une pulsation pour accomplir une vibration complète, si dans un cas la distance est double de ce qu'elle est dans un autre cas, la vitesse de vibration devra être moitié moindre. En général, la vitesse de vibration est inversement proportionnelle à la longueur du tube parcourue par les pulsations.

Mais pour que le courant d'air puisse s'approprier aux exigences du tube, il doit être doué d'une certaine flexibilité. Avec un peu d'attention, on comprend que la puissance de la pulsation réfléchie sur le courant doit dépendre, à quelque degré, de la force de ce courant. Un courant plus fort, comme une corde plus fortement tendue, exige une plus grande force pour être infléchi, et après s'être infléchi, il vibre plus rapidement. En conséquence, pour obtenir la note fondamentale du tube, il faut souffler très-doucement à son extrémité ouverte; dans ces conditions, le son rendu est riche, plein, et tout à fait musical. Si on souffle un peu plus fort, le son tend à n'être plus que du bruit. En soufflant plus fort encore, on fait rendre au tube un son beaucoup plus élevé que le son fondamental. C'est le premier son harmonique, et, pour le produire, la colonne d'air s'est divisée en deux portions vibrantes, séparées par un nœud. Soufflons toujours plus fort, le son est de plus en plus élevé ; le tube est maintenant divisé en trois portions vibrantes, séparées par deux nœuds. Enfin, une insufflation forte et soudaine a pour résultat une note plus élevée que toutes celles qui précèdent.

La figure 89 représente les divisions de la colonne d'air correspondantes aux trois premières notes d'un tube fermé à l'une de ses extrémités. En *a* et *b*, qui correspondent à la note fondamentale, la colonne n'est pas divisée ; le fond du tube est le seul nœud, et les impulsions parcourent simplement le tube dans les deux sens opposés indiqués par les flèches. En *c* et *d*, correspondants au premier harmonique, il existe une surface nodale marquée par la ligne ponctuée, où les pulsations viennent aboutir, et d'où elles sont réfléchies comme elles le seraient à la rencontre d'une surface matérielle. Cette surface nodale est située au tiers de la longueur du tube à partir de l'extrémité ouverte. En *e* et *f*, qui correspondent au second harmonique, il y a deux surfaces nodales, dont la plus haute est distante de l'extrémité ouverte d'un cinquième de la longueur du tube; les quatre au-

Fig. 89.



tres cinquièmes se trouvant divisés en deux parties égales par la seconde surface nodale. Les flèches, comme précédemment, marquent la direction des pulsations.

Cherchons maintenant les relations qu'ont entre elles ces notes successives.

La distance entre deux nœuds consécutifs est ce que nous avons nommé un segment vibrant ou ventre; la distance d'un nœud au milieu d'un ventre est donc un demi-segment vibrant. Votre esprit comprendra et retiendra facilement cette loi, que *le nombre des vibrations est directement proportionnel au nombre des demi-segments vibrants* dans lesquels le tube est divisé. Ainsi, lorsque c'est la note fondamentale qui se produit, nous n'avons qu'un demi-segment vibrant. Le fond du tube est un nœud, et l'extrémité ouverte, pendant le mouvement de l'air, est le milieu d'un segment vibrant. Lorsque le mode de division est celui qui est représenté en *c* et *d*, nous avons trois demi-segments vibrants; en *e* et *f*, nous en avons cinq. Il en résulte que les nombres de vibrations qui correspondent à cette série de notes croissent comme les nombres impairs 1, 3, 5. Et si nous obtenions des notes plus élevées, leurs vitesses de vibration seraient représentées par la suite des nombres impairs 7, 9, 11, 13, 15, etc.

Un instant d'attention suffira pour vous convaincre que telle doit être la loi de succession des sons. En effet, la durée d'une vibration dans c ou d est celle qui convient à un tube fermé par un bout et de longueur xy; et parce que cette longueur n'est que le tiers de la longueur du tube total, ses vibrations doivent être trois fois plus rapides. De même, la durée des vibrations dans e et f est celle d'un tube fermé de la longueur $x'y'$; et parce que cette longueur est le cinquième de celle du tube total, le mouvement vibratoire doit être cinq fois aussi rapide. Nous obtenons ainsi la suite 1, 3, 5, et ce même mode de raisonnement s'étendrait à la série entière des nombres impairs.

Cette fois encore, nos affirmations recevront la sanction de l'expérience. Voici deux tubes, dont l'un est trois fois plus long que l'autre. Faisons rendre au plus long la note fondamentale, et la note immédiatement au-dessus. Les nombres de vibrations de ces deux notes, comme nous l'avons vu, sont entre eux dans le rapport de 1:3. La seconde doit donc être précisément la note fondamentale du tube le plus court. Et, en effet, embouchés à la fois, les deux tubes rendent des sons identiques.

Tout le monde comprendra qu'il suffit d'assembler une série de tubes de longueurs décroissantes pour former l'instrument primitif qu'on nomme la flûte de Pan, et que vous connaissez tous si bien.

Les divisions successives d'une verge fixée à l'un de ses bouts et les relations entre ses tons harmoniques (décrites page 171) sont identiquement celles que nous venons de constater pour la colonne d'air d'un tube fermé à l'une de ses extrémités.

Passons des tubes fermés à une extrémité, et que nous appellerons simplement pour abréger *tubes fermés*, aux tubes ouverts à leurs deux extrémités, que nous nommerons *tubes ouverts*. En comparant d'abord un tube fermé avec un tube ouvert, nous trouvons que la note du second est l'octave de la note du premier. C'est un résultat général. Un tube ouvert rend toujours l'octave de la note émise par un tube fermé de même longueur. Dans cette collection de tubes ouverts, choisissons-en quatre qui soient à l'unisson avec nos quatre diapasons. Chacun de ces tubes ouverts est double en longueur du tube fermé qui sonne à l'unisson du même diapason. Pour qu'un tube ouvert rende la même note qu'un tube fermé, il faut que sa longueur soit deux fois plus grande. Et, puisque la longueur d'un tube fermé rendant sa note fondamentale est le quart de la longueur de son onde sonore, la longueur du tube ouvert est la moitié de celle de l'onde qu'il produit.

Il n'est pas facile d'obtenir une note musicale soutenue en soufflant à l'extrémité d'un tube ouvert; mais un souffle suffit à une oreille exercée pour reconnaître le ton du son rendu. C'est toujours la note d'un tube fermé moitié moins long que le tube ouvert.

Il est divers moyens de mettre l'air en mouvement aux extrémités des tuyaux et des tubes, de manière à faire vibrer la colonne d'air intérieur.

On y parvient dans les tuyaux d'orgues, en lançant une mince couche d'air contre un bord tranchant. Il en résulte un frémissement, dont certaines pulsations se convertissent en un son musical par la résonnance de la colonne d'air qui lui est associée.

Vous comprendrez sans peine, avec l'aide de la figure 90, la construction de ce tuyau d'orgue ouvert, dont une face a été enlevée pour que vous puissiez voir son intérieur. L'air parti du réservoir où il est comprimé traverse le tube *t* et arrive dans la chambre C fermée à son sommet, à l'exception d'une fente étroite *ed* par laquelle l'air sort. Ce mince cou-

Fig. 90.

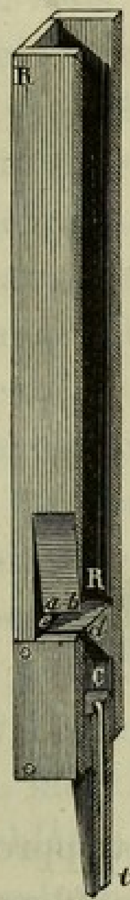
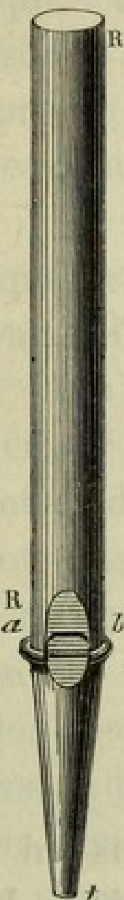


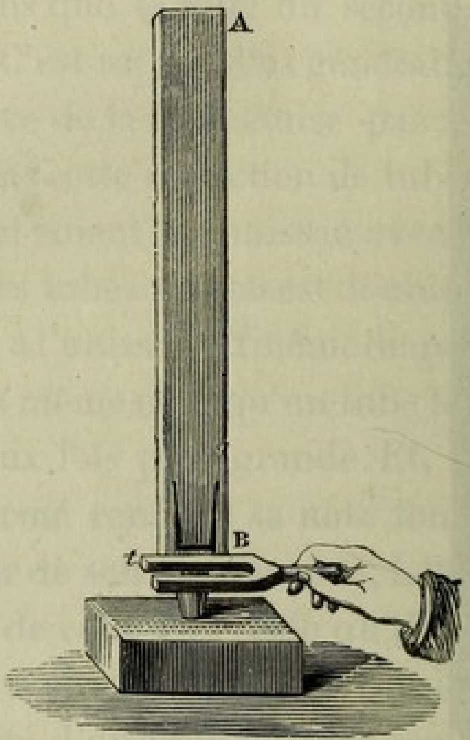
Fig. 91.



rant d'air se brise contre le tranchant *ab*, et produit ainsi le bruit frémissant dont une pulsation spéciale ou sympathique se transforme en son musical par la résonnance du tuyau. L'espace compris entre le tranchant *ab* et la *fente* située au dessous est ce qu'on nomme *l'embouchure*. La figure 91 représente un tuyau fermé de même longueur que celui de la figure 90, et rendant par conséquent une note plus basse d'une octave.

Au lieu de déterminer ainsi le frémissement de l'air, on peut appliquer à l'embouchure un diapason vibrant synchroniquement avec le tuyau d'orgue, comme en AB (*fig.* 92). Le tuyau résonne. Prenons quatre tuyaux de différentes longueurs, et quatre diapasons de périodes de vibrations différentes. Commençant par le tuyau le plus long, excitons celui

Fig. 92.

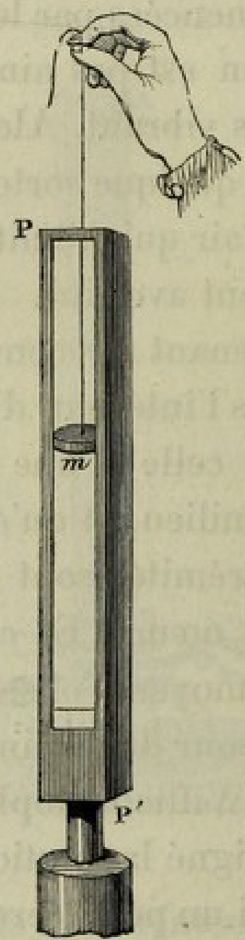


des diapasons qui vibre le plus lentement, et approchons-le de l'embouchure. Le tuyau *parle* avec force. Soufflons maintenant dans ce même tuyau : le son est celui que provoquait le diapason. Allons successivement d'un tuyau à l'autre, nous trouverons dans tous les cas que la note rendue par le tuyau, quand on y souffle, est exactement celle produite quand on approche de son embouchure le diapason consonnant. Si nous approchons tour à tour les quatre diapasons d'une même embouchure, ils feront naître des pulsations de quatre ordres différents; mais entre ces quatre périodes de vibrations, le tuyau en choisira seulement une. Et si, au lieu de quatre diapasons, nous en approchions quatre cents de son embouchure, le tuyau ferait toujours son choix. Il en sera encore de même si aux pulsations des diapasons nous substituons celles que fait naître le courant d'air lancé contre le bord tranchant de l'embouchure.

Les vibrations de la masse lourde du diapason ne sont pas sensiblement influencées par le mouvement de l'air dans le tuyau. Mais il n'en est pas ainsi lorsque c'est l'air lui-même qui est le corps vibrant. Alors, ainsi que nous l'avons vu, le tuyau crée, en quelque sorte, son propre diapason en forçant le courant d'air qui frémit à son embouchure de vibrer synchroniquement avec lui.

Nous avons maintenant à reconnaître quel est l'état ou la condition de l'air dans l'intérieur d'un tuyau qui rend sa note fondamentale. C'est celle d'une verge libre à ses deux bouts, tenue par son milieu, et qu'on fait vibrer longitudinalement. Les deux extrémités sont des ventres de vibration, et le milieu est un nœud. Et comment le savons-nous? Avons-nous quelque moyen d'observer et de *sentir* les vibrations de la colonne pour déterminer ainsi ses nœuds et ses ventres? L'excellent William Hopkins, dont nous déplorons la perte, nous a enseigné la solution suivante de cet intéressant problème. Voici un petit cerceau sur lequel est tendue une membrane mince, facile à entrer en vibration. La face antérieure de ce tuyau d'orgue PP' (*fig.* 93) est vitrée et laisse voir ce qui se passe dans l'intérieur. A l'aide d'un cordon, on peut à volonté faire monter ou descendre ce petit tambourin *m* tout le long du tuyau. Arrêtons-le juste au-dessus de l'extrémité supérieure de la colonne d'air, et faisons sonner le tuyau. Nous entendons aussitôt le bruyant frémissement de la membrane. Descendons-la dans le tuyau, elle continue à frémir, mais voici que son bruit s'affaiblit, et maintenant il est complétement éteint. Nous ne voyons pas la position de la membrane, mais nous ne craignons pas d'affirmer qu'elle est actuellement au milieu du tuyau. Elle ne vibre plus, parce que l'air qui l'entoure est en repos. Laissons-la descendre encore ; le frémissement recommence et se continue jusqu'à ce que la membrane arrive au fond du tuyau.

Fig. 93.

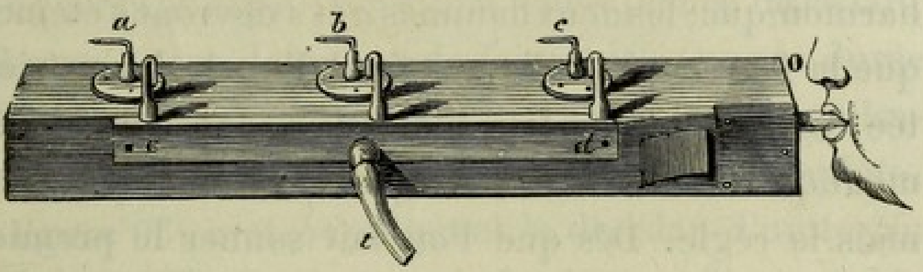


Ainsi, que nous l'élevions ou que nous l'abaissions dans une succession rapide, dans chaque descente et dans chaque montée nous aurons toujours deux périodes de son séparées par une période de silence. Si un peu de sable était répandu sur la membrane, on pourrait le voir danser au-dessus et au-dessous du milieu, mais rester immobile au milieu. Nous prouvons ainsi expérimentalement qu'un tuyau d'orgue qui rend sa note fondamentale se divise en deux demi-segments vibrants ou ventres séparés par un nœud.

Quelle est la condition de l'air en ce nœud? C'est encore celle du milieu d'une verge libre à ses deux bouts, vibrant longitudinalement et rendant sa note fondamentale. Les pulsations réfléchies aux deux extrémités, soit de la verge, soit de la colonne d'air, se rencontrent au milieu et y produisent une compression; elles rétrogradent ensuite et produisent une dilatation. Ainsi, d'une part, le milieu ne vibre pas, mais c'est en ce point qu'ont lieu les plus grandes variations de densité; d'autre part, aux deux extrémités, les molécules vibrent avec une parfaite liberté, mais sans variation de densité.

Si le tuyau était percé en son milieu et que l'orifice fût fermé par une membrane, pendant les périodes de condensation l'air intérieur presserait la membrane de dedans en dehors, et pendant les périodes de dilatation l'air extérieur la presserait de dehors en dedans. La membrane vibrerait donc à l'unisson de la colonne d'air. Le tuyau d'orgue que voici (*fig.* 94) est disposé de telle sorte qu'un petit jet de gaz

Fig. 94.



b puisse être allumé en face de son centre et y recevoir l'impression du mouvement vibratoire de la membrane, tel que nous l'avons décrit. Deux autres jets de gaz *a* et *c* sont placés à mi-chemin des intervalles qui séparent le milieu des extrémités du tuyau. Les trois becs *a*, *b*, *c* sont alimentés de gaz de la manière suivante : le tube *t* conduit le gaz dans la chambre creuse *e d*, d'où partent trois petits tuyaux recourbés, qui communiquent chacun avec une petite cavité fermée en bas par une membrane en contact direct avec l'air intérieur du tuyau. De ces trois cavités sortent les petits becs *a*, *b*, *c*. Allumons-les et soufflons dans le tuyau pour lui faire rendre sa note fondamentale. Les trois flammes sont agitées, mais la flamme du milieu beaucoup plus que les deux autres. Diminuons les flammes, rendons-les très-petites ; puis soufflons dans ce tuyau, la flamme du milieu *b* s'éteindra, tandis que les autres resteront allumées. Rallumons les jets de gaz et faisons résonner la note fondamentale une demi-douzaine de fois ; chaque fois la flamme du milieu s'éteindra.

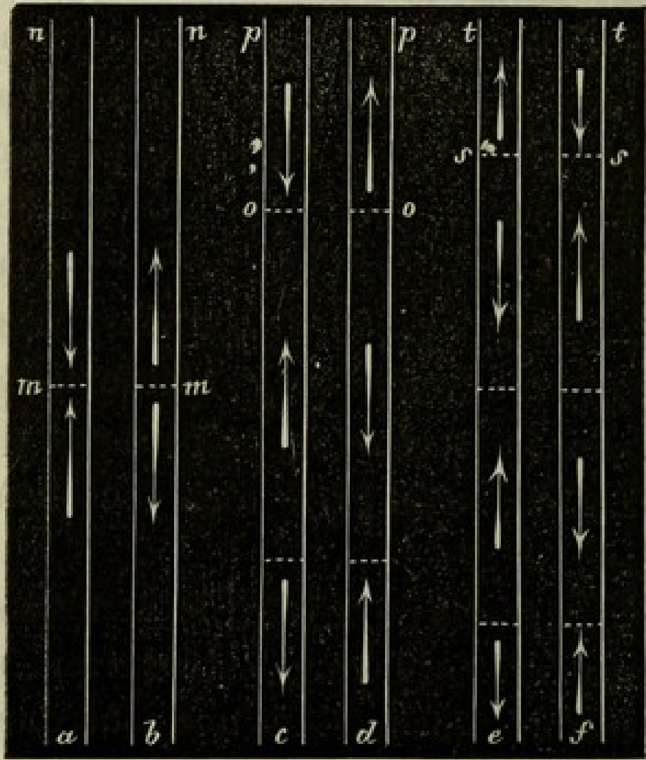
En soufflant dans le tuyau plus vivement, nous déterminons la colonne d'air à se subdiviser et à rendre son premier son harmonique. Le nœud du milieu n'existe plus. Le centre du tuyau est maintenant un point de vibration maximum, et deux nœuds se sont formés aux milieux des intervalles entre le milieu et les extrémités. Mais s'il en est ainsi, et s'il est vrai que la flamme opposée à un nœud reçoive l'impression d'un souffle lorsque nous faisons rendre au tuyau son premier son harmonique, les deux flammes *a* et *c* devront s'éteindre, tandis que la flamme du milieu restera allumée. L'expérience, répétée trois ou quatre fois successivement, prouve invinciblement qu'il en est ainsi ; ce fait n'est donc pas un accident, mais la règle. Dès que l'on fait sonner le premier harmonique, les deux flammes des nœuds s'éteignent infailliblement, tandis que la flamme *b*, correspondant au milieu des segments vibrants, n'est pas sensiblement troublée.

Théoriquement, il n'est pas de limites aux subdivisions successives d'un tuyau d'orgue, soit ouvert, soit fermé. Dans les tuyaux fermés, nous commençons par un demi-segment vibrant, et nous passons tour à tour à 3, 5, 7... demi-segments vibrants ; le nombre des vibrations des notes successives augmentant dans les mêmes rapports. Dans les tuyaux ouverts, nous commençons par 2 demi-segments vibrants, et nous arrivons à 4, 6, 8, 10... ; les vitesses de vibration augmentant dans le même rapport, c'est-à-dire dans le rapport des nombres naturels 1, 2, 3, 4, 5... Par conséquent, dans un tuyau ouvert, le passage du ton fondamental au premier harmonique donne l'octave du ton fondamental. Dans un tuyau fermé, le même passage donne la quinte au-dessus de l'octave. Dans les deux cas, tout mode intermédiaire de vibration est impossible. Si le son fondamental d'un tuyau fermé est le produit de 100 vibrations par seconde, le premier harmonique sera produit par 300 vibrations, le second par 500, et ainsi de suite. Un semblable tuyau ne saurait, par exemple, exécuter 200 ou 400 vibrations par seconde. De même le tuyau ouvert, dont la note fondamentale résulte de 100 vibrations par seconde, ne peut pas vibrer 150 fois dans une seconde, mais passe d'un seul bond à 200, 300, 400, et ainsi de suite.

Dans les deux sortes de tuyaux, le nombre des vibrations exécutées dans l'unité de temps est inversement proportionnel à la longueur du tuyau. C'est une conséquence de ce fait, sur lequel nous avons déjà tant de fois insisté, que la durée d'une vibration est déterminée par la distance que la pulsation sonore a à parcourir pour faire une vibration complète.

Dans la figure 95, *a* et *b* indiquent la division d'un tuyau ouvert pour la production de la note fondamentale ; *c* et *d* la division correspondante à son premier harmonique ; *e* et *f* la division correspondante au second harmonique. La distance *mn* est la moitié, *op* est le quart, *st* est le sixième de la longueur totale du tuyau. Ces trois longueurs sont donc entre elles comme les trois nombres 1, 2, 3. Mais la note ou le ton de *a* est celui que donnerait un tuyau fermé de longueur *mn* ; le ton de *c*, celui d'un tuyau fermé de longueur *o p* ; le ton de *e*, celui d'un tuyau fermé de longueur *s t*. Donc, puisque ces longueurs sont entre elles comme 1 : 2 : 3, les vitesses de vibrations seront aussi dans le rapport de ces nombres. Il suffit de jeter un regard sur ces modes respectifs de vibration pour en conclure que la succession des tons dans un tuyau ouvert correspond à la suite naturelle des nombres.

Fig. 95.



Dans la figure 95, la longueur du tuyau *a* est double de celle du tuyau *a* de la figure 89 ; on a voulu qu'il en fût ainsi. Il est évident que pour accomplir une vibration complète, la pulsation doit parcourir la même distance dans les deux tuyaux, et que dès lors les deux tuyaux rendront le même son. Le tuyau ouvert *an* se compose virtuellement de deux tuyaux fermés, ayant en *m* pour base commune la surface nodale *m*. La simple inspection des modes respectifs de vibrations prouve donc que la relation du tuyau fermé au tuyau ouvert est bien celle que nous avons établie par l'expérience.

Si ce qui précède nous est devenu parfaitement intelligible, nous sommes en mesure d'aborder des problèmes qui, au premier aspect, nous auraient semblé complétement insolubles. Nous avons déjà appris que les vitesses relatives du son dans les différents corps peuvent se déduire des notes qu'ils émettent quand on les fait vibrer longitudinalement; et nous avons fait remarquer à cette occasion que pour dresser un tableau de vitesses *absolues*, dans les corps solides, nous n'avions besoin que de connaître le rapport exact de la vitesse du son dans un seul de ces corps à la vitesse dans l'air. Nous sommes maintenant à même de nous procurer la donnée qui nous faisait défaut. Car nous savons que les vibrations de l'air dans un tuyau ouvert s'exécutent précisément comme celles d'une verge libre à ses deux bouts. La différence entre les vitesses de vibration d'une verge et d'un tuyau ouvert de même longueur ne peut, par conséquent, dépendre que des vitesses différentes avec lesquelles les pulsations se propagent dans l'une et l'autre. Prenons donc un tuyau d'orgue d'une certaine longueur, rendant un son d'un certain ton, et cherchons la longueur d'une verge de sapin rendant la même note. Nous trouverons que cette longueur est dix fois celle du tuyau d'orgue, ce qui prouve que la vitesse du son dans le sapin est décuple de la vitesse dans l'air. Or, la vitesse absolue dans l'air est de $332^{m},2$ par seconde; donc la vitesse absolue dans le sapin est de 3322 mètres; c'est bien celle que nous lui avons assignée dans la première leçon (page 45). C'est à l'illustre Chladni que nous sommes redevables de cette méthode de détermination de la vitesse du son dans les corps solides.

Nous avons donné aussi dans cette première leçon un tableau des vitesses du son dans d'autres gaz que l'air. Comment ce tableau a-t-il pu être dressé ? En y réfléchissant, vous trouveriez certainement la réponse à cette question. Il suffirait, en effet, de se procurer une série de tuyaux qui, remplis de ces différents gaz, rendraient la même note; les longueurs de ces tuyaux donneraient les vitesses relatives du son dans les gaz. Vous constateriez ainsi que la longueur du tuyau rempli d'hydrogène est quatre fois celle du tuyau plein d'oxygène, et que par conséquent la vitesse du son dans le premier gaz est quadruple de sa vitesse dans le second.

Nous avions donné de même un tableau des vitesses du son dans les divers liquides. Comment avait-il pu être obtenu? en remplissant de ces liquides des tuyaux d'orgues convenablement construits, et comparant les tons des sons rendus. On trouve ainsi que, pour rendre le même son, un tuyau rempli d'eau doit avoir un peu plus de quatre fois la longueur du tuyau rempli d'air, de sorte que la vitesse du son dans l'eau est à peu près quatre fois sa vitesse dans l'air. Ces rapprochements ont pour but de montrer clairement comment nos connaissances acquises nous mettent à même, peu à peu, de lutter avec les problèmes les plus inabordables. Nous n'entrerons pas dans les détails minutieux de ces mesures délicates, parce qu'ils ne sont pas nécessaires pour le but que nous voulons atteindre. Mais vous concevez très-bien que toutes les expériences sur les gaz puissent être faites avec le même tuyau d'orgue, parce que la vitesse du son dans chacun d'eux se déduirait immédiatement du ton du son qu'il rend. Avec un tuyau de longueur constante, le ton, en d'autres termes le nombre des vibrations par seconde, serait directement proportionnel à la vitesse du son. Ainsi, en comparant l'hydrogène avec l'oxygène, nous trouverions que le ton du son rendu par le premier gaz serait la double octave du son rendu par le second, d'où nous conclurions que la vitesse du son dans l'hydrogène est quatre fois sa vitesse dans l'oxygène. La même remarque est applicable aux liquides. Cette fois encore, il suffirait d'un seul tuyau pour conclure du ton rendu les vitesses du son dans les différents liquides.

La longueur d'un tuyau ouvert étant de fait, comme nous l'avons vu, la moitié de la longueur de son onde sonore, il suffit de déterminer avec la sirène le nombre des vibrations exécutées par le tuyau en une seconde, et de multiplier ce nombre par le double de la longueur du tuyau pour obtenir la vitesse du son dans le gaz qui remplit le tuyau. Ainsi, un tuyau ouvert d'une longueur de 66 centimètres, rempli d'air, exécute 256 vibrations par seconde; la longueur de son onde sonore est de $1^{m},32$: multiplions cette longueur par 256, et nous aurons 338 mètres pour la vitesse du son dans l'air, à la température ambiante. Si le gaz expérimenté était de l'acide carbonique, les vibrations seraient plus lentes; si c'était de l'hydrogène, elles seraient plus rapides. Par l'application du même principe, on obtiendrait la vitesse du son dans ces deux gaz.

L'application du principe n'est pas restreinte aux gaz. La longueur d'un tuyau ouvert qui sonne dans l'eau est la moitié de la longueur de l'onde sonore qu'il engendre dans cette eau. De même, la longueur d'une verge solide libre par ses deux bouts est la moitié de la longueur de l'onde sonore au sein de la substance *du solide*. Nous n'avons donc qu'à déterminer la vitesse de vibration d'une semblable verge, et à la multiplier par le double de sa longueur, pour obtenir la vitesse du son dans la substance dont la verge est formée. N'êtes-vous pas vivement impressionnés de la portée d'une science qui déjà nous a rendus capables de résoudre de pareils problèmes? Et pourrions-nous refuser notre admiration au vieux chercheur Chladni qui nous a appris à les maîtriser expérimentalement?

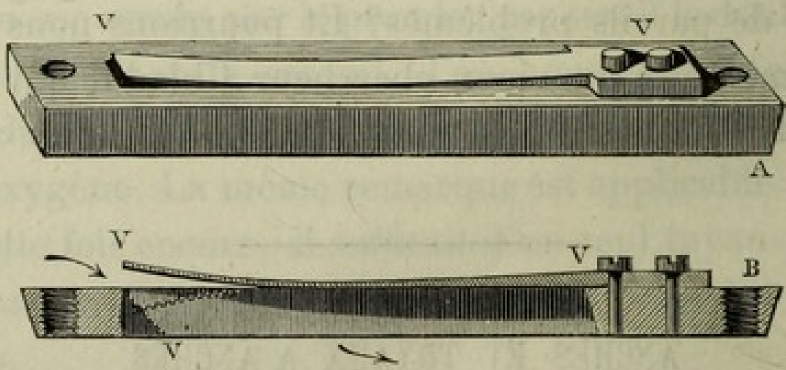
ANCHES ET TUYAUX A ANCHES

Vous avez sans doute encore présente à l'esprit la construction de la sirène, et nos expériences avec cet instrument.

Les sons musicaux sont produits par la conversion en pulsations distinctes d'un courant d'air continu. On obtient le même effet par l'emploi d'une anche vibrante, comme nous le voyons dans l'accordéon, la concertina et l'harmonium. Dans ces instruments, ce ne sont pas les vibrations de l'anche elle-même qui, communiquées à l'air et transmises par l'air aux organes de l'ouïe, causent la sensation musicale; la fonction de l'anche est non pas d'engendrer mais de distribuer, de mouler en quelque sorte, en une série de souffles discontinus, ce qui serait, sans elle, un courant d'air continu.

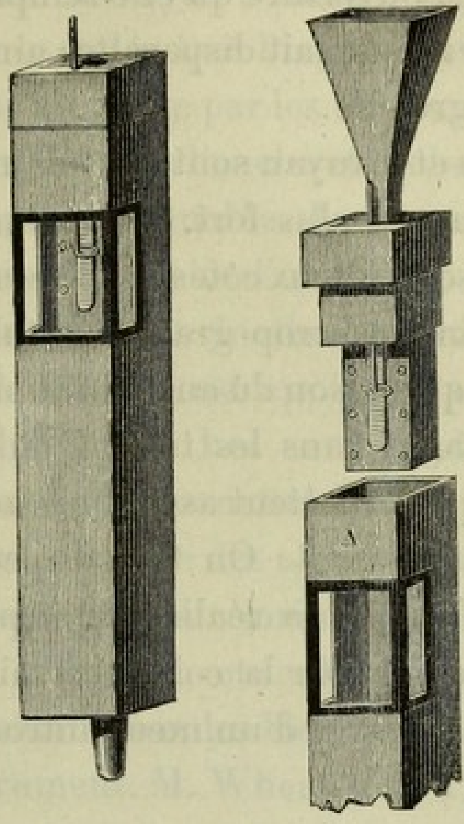
Les anches, quand elles sont associées aux tuyaux d'orgues, commandent quelquefois les vibrations de la colonne d'air, et quelquefois sont commandées par elles. Quand elles sont inflexibles, elles gouvernent la colonne d'air; quand elles sont flexibles, la colonne d'air les gouverne. Dans le premier cas, pour mettre en jeu la colonne d'air du tube, il faut régler sa longueur de telle sorte que sa note fondamentale, ou l'un de ses harmoniques, correspondent à la vitesse de vibration de l'anche. L'anche métallique employée communément dans les tuyaux d'orgue est représentée (*fig.* 96),

Fig. 96.



A et B, en perspective et en section. Elle est formée d'une languette de métal longue et flexible VV, installée dans un orifice rectangulaire qui donne entrée au courant d'air dans le tuyau. La figure 97 montre de quelle manière l'anche et

Fig. 97.



le tuyau sont associés. La face antérieure *bc* du compartiment contenant la languette flexible est une vitre qui permet de la voir. Un cône creux AB surmonte l'anche[1]. Le fil d'archal qui appuie sur l'anche sert à la raccourcir ou à l'allonger, pour faire varier ainsi, entre certaines limites, sa vitesse de vibration. L'anche la plus en usage autrefois fermait l'ouverture en retombant simplement sur ses bords ; chaque pulsation de l'anche produisait un battement, et la succession de ces battements se traduisait par un son criard et perçant, qui altérait matériellement le son du tuyau

[1] Les coupes de tuyaux et d'anches, représentées ici, ont été prises dans l'excellent ouvrage de M. Helmholtz.

d'orgue associé à l'anche. On diminuait cet inconvénient sans toutefois le faire disparaître complétement, en recouvrant les bords de l'anche d'une bande de cuir mou. Aujourd'hui l'anche généralement employée est l'*anche libre*, vibrant entre les bords de l'ouverture qu'elle remplit presque, mais non pas entièrement : on fait disparaître ainsi ce que le son présentait de désagréable.

Lorsque l'anche et le tuyau sont parfaitement synchrones, le son est plus pur et plus fort. Cependant, une certaine latitude est permise des deux côtés de ce synchronisme parfait. Si la discordance est trop grande, le tube ne sert plus à rien ; on n'entend que le son dû aux vibrations de l'anche.

On fait aussi usage, dans les tuyaux d'orgues, d'anches flexibles en bois, qui se prêtent assez bien aux exigences des tuyaux qui les surmontent. On trouve peut-être dans un tuyau de paille de froment la réalisation la plus simple d'une anche libre commandée par la colonne d'air. A la distance d'environ trois centimètres d'un nœud introduisons dans un

Fig. 98.

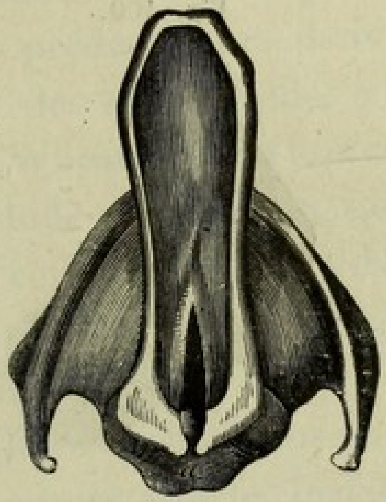
brin de cette paille, sr' (*fig.* 98), une lame de canif, jusqu'au quart à peu près du diamètre du tuyau, et en faisant avancer le tranchant à plat vers le nœud, séparons de la tige une petite languette de trois centimètres de long, cette languette rr' est l'anche et la paille est le tuyau. Il a actuellement 20 centimètres de longueur. Soufflons : le son rendu est vraiment musical ; coupons le tuyau et réduisons sa longueur à 15 centimètres, le son est plus élevé. Coupons de nouveau, la longueur est de dix centimètres et le ton s'élève encore. La longueur n'est plus que de 5 centimètres, et le son est très-aigu, très-perçant. Dans toutes ces expériences, une seule et même anche s'accommode aux exigences des diverses colonnes d'air.

La clarinette est un tuyau à anche. Elle n'a qu'une languette assez large associée à un long tuyau cylindrique. L'extrémité de l'anche est saisie par les lèvres, et sous leur pression la fente ménagée entre l'anche et les bords qui la portent se rétrécit au degré convenable. Les sons harmoniques de la clarinette diffèrent de ceux d'une flûte. La flûte, en effet, est un tuyau ouvert; la clarinette est un tuyau fermé, l'extrémité à laquelle l'anche est appliquée correspond à l'extrémité fermée du tuyau. Les sons rendus par une flûte suivent l'ordre des nombres naturels, 1, 2, 3, 4, etc.; ou, ce qui revient au même, l'ordre des nombres pairs 2, 4, 6, 8, etc.; tandis que les sons d'une clarinette suivent l'ordre des nombres impairs 1, 3, 5, 7, etc. On obtient les notes intermédiaires en pressant sur les clefs pour ouvrir les orifices latéraux de l'instrument. M. Wheatstone a le premier signalé la différence entre la flûte et la clarinette, et ses résultats s'accordent avec les recherches récentes de M. Helmholtz. Dans le hautbois et le basson nous avons deux anches inclinées l'une sur l'autre, formant entre elles un angle aigu, et que sépare une fente par laquelle entre l'air. Le tuyau du hautbois est *conique*, et ses sons harmoniques sont ceux d'un tuyau ouvert, différents, par conséquent, de ceux de la clarinette. L'extrémité pulpeuse d'un brin de paille de blé vert peut être fendue de manière à former une anche double analogue à celle du basson ou du hautbois, et il rend un son musical. Dans le cor, la trompette et le serpent, les lèvres de l'exécutant remplissent la fonction de l'anche. Ces instruments sont formés de longs tubes coniques, et leurs sons harmoniques sont ceux d'un tuyau d'orgue ouvert. Les anciens instruments de ce genre étaient limités aux sons harmoniques, et la production de l'un ou l'autre de ces sons dépendait de la force du souffle, comme aussi de la tension des lèvres. Il est d'usage aujourd'hui de combler les intervalles entre les sons harmoniques au moyen de clefs, qui permettent à l'exécutant de faire varier à volonté la longueur de la colonne d'air vibrante.

Le plus parfait des instruments à anches est l'organe de la voix. Chez l'homme, cet organe est placé à la partie supérieure de la trachée-artère, dont la tête est disposée de manière à prêter des points d'attache à certaines bandes élastiques qui en ferment presque l'ouverture. Lorsqu'un courant d'air venant des poumons force l'entrée de la fente qui sépare ces bandes ou *cordes vocales*, elles entrent en vibration ; en faisant varier leur tension on change la vitesse de vibration, et le son rendu est plus ou moins élevé. Les vibrations des cordes vocales ne sont pas pratiquement affectées par la résonnance de la bouche. Cependant nous verrons plus loin que cette résonnance, en renforçant l'un ou l'autre des sons des cordes vocales, exerce une influence frappante sur le timbre de la voix. La douceur et le moelleux de la voix humaine dépendent de la fermeture exacte, à intervalles réguliers, de la fente de la glotte durant la vibration. Si l'appareil de la voix que vous entendez actuellement se montrait à vous, vous constateriez sans doute, ou que les bords des cordes vocales sont plus ou moins éraillés, ou qu'elles frottent l'une contre l'autre, ou qu'elles ferment imparfaitement la fente pendant leur vibration ; et la dureté de sons que vous supportez si patiemment vous serait ainsi expliquée.

On peut éclairer les cordes vocales et les rendre visibles à l'aide d'un miroir convenablement placé au fond de la bouche. Nous avons essayé de projeter sur un écran l'image du larynx de M. Czermak, sans pouvoir réussir complétement. Mais on voit très-bien cet organe avec le laryngoscope, dans l'acte de parler, de chanter, de tousser ; et ses mouvements dans chacune de ces fonctions sont très-distincts. Il est représenté à l'état de repos dans la figure 99.

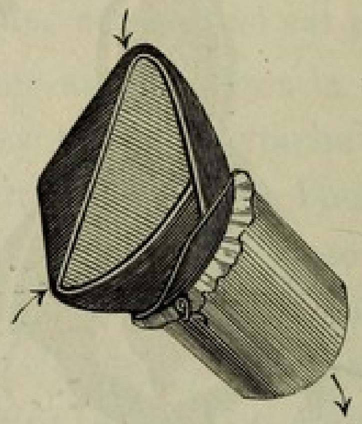
Fig. 99.



L'altération de la voix dans le rhume provient, suivant M. Helmholtz, de flocons de mucosités qui s'introduisent dans la fente de la glotte, et qu'on distingue au moyen du laryngoscope. Certaines personnes ne peuvent crier que dans la voix de fausset ; cette espèce d'infirmité de la voix est attribuée par M. Helmholtz à la disparition de la couche de mucosité, ordinairement placée au-dessous des cordes vocales et qui fait l'effet d'un poids. Les cordes ainsi déchargées sont plus légères et leurs bords plus tranchants ; leur élasticité reste la même, mais leurs vibrations sont nécessairement plus rapides. La promptitude et l'exactitude avec lesquelles la tension des cordes vocales, leur forme, l'ouverture, la largeur de la fente qui les sépare, jointes à la résonnance élective de la cavité de la bouche, font de l'organe de la voix le plus parfait des instruments de musique.

Jean Muller, célèbre professeur d'anatomie comparée, imitait l'action des cordes vocales avec des bandes de caoutchouc. Il fermait l'extrémité ouverte d'un tube de verre avec deux de ces bandes, laissant entre elles une fente. En soufflant à travers la fente, ces bandes entraient en vibration, et il se produisait un son musical. Helmholtz recommande la forme, que représente la figure 100, dans laquelle,

Fig. 100.



au lieu de se terminer par une section perpendiculaire à son axe, le tube est fermé par deux sections obliques sur lesquelles on applique les bandes de caoutchouc toujours séparées par une fente. Le moyen le plus facile d'obtenir des sons avec des anches de cette espèce consiste à enrouler autour de l'extrémité d'un tube de verre un mince ruban de caoutchouc, qui dépasse cette extrémité de deux ou trois centimètres. Prenant dans les doigts les deux parties opposées de ce prolongement, on les étire, il se forme une fente, et en soufflant à travers cette fente on produit un son musical, dont le ton varie avec le degré de tension des parois du tube élastique.

La formation des voyelles dans la voix humaine a provoqué depuis longtemps les recherches des physiciens. Nous savons distinguer parfaitement les sons de deux voyelles, même alors qu'elles ont le même ton et la même intensité.

Quelle est donc la qualité qui rend cette distinction possible? Dans l'année 1779, l'Académie de Saint-Pétersbourg fit de cette question un sujet de prix, décerné à Kratzenstein, qui était heureusement parvenu à imiter les sons-voyelles par des dispositions mécaniques. A la même époque, Von Kempelen, de Vienne, fit des expériences semblables, mais mieux organisées. La question fut reprise plus tard par M. Willis, qui dépassa tous ses prédécesseurs dans sa solution expérimentale. La théorie des sons-voyelles a été établie pour la première fois par M. Wheatstone, et tout récemment M. Helmholtz en a fait une étude approfondie, qui ne laisse plus rien à désirer. Avec les connaissances que déjà vous avez acquises, vous trouverez peu de difficultés à comprendre l'origine de ces sons mystérieux.

Voici une anche libre ajustée dans une cloison, à laquelle aucun tuyau n'est encore associé. Installons-la sur un sommier acoustique et forçons l'air à la traverser; elle parle avec une grande énergie. Adaptons maintenant à la cloison un tuyau pyramidal : vous constatez qu'un changement est survenu dans le timbre, et si nous appliquons la main à plat sur l'extrémité ouverte du tube, nous serons frappés de la ressemblance du son rendu avec celui de la voix humaine. Ma main restant appliquée sur l'extrémité ouverte du tube, de manière à le fermer entièrement, élevons-la et abaissons-la deux fois dans une succession rapide; nous entendrons le mot *maman* aussi clairement que s'il était prononcé par un enfant. A ce tube pyramidal, substituons en un autre plus court, et répétons l'expérience. Nous entendons encore le mot «maman,» mais articulé comme il pourrait l'être par un enfant dont le nez serait bouché. En associant à une anche vibrante un tuyau convenable, nous pouvons donc donner aux sons de l'anche les qualités de la voix humaine.

Cela posé, dans l'organe de la voix humaine, les cordes vocales forment une anche associée à la cavité sonore de la bouche, dont la forme se modifie de manière à résonner à l'unisson, soit du ton fondamental, soit de l'un quelconque des sons harmoniques. Grâce à l'intervention de la bouche, nous pouvons produire ensemble le son fondamental et les sons harmoniques de la voix dans diverses proportions, et ce sont ces mélanges qui donnent naissance aux différents sons voyelles. Voici une série de diapasons ; excitons l'un d'eux, et le plaçant à l'entrée de la bouche, ajustons les dimensions de cette cavité de telle sorte qu'elle résonne à l'unisson du diapason ; cela fait, éloignons le diapason, et sans rien changer à la forme ou aux dimensions actuelles de la bouche, émettons l'air par la glotte. Le son, sortant ainsi de la bouche, se trouve être la voyelle ou, et pas un autre. Prenons un second diapason, excitons-le, tenons-le en face de la bouche, puis ouvrons-la ou fermons-la, jusqu'à ce qu'elle résonne à l'unisson du diapason. Retirons le diapason, faisons sortir l'air par la glotte, et le son voyelle o sera le seul que nous puissions émettre. En réglant l'ouverture de la bouche sur un troisième diapason, et soufflant à travers le larynx, nous ferions entendre le son *ah !* sans pouvoir en faire naître un autre. Dans ces trois cas, les cordes vocales sont restées constamment dans les mêmes conditions ; elles ont engendré le même ton fondamental, les mêmes sons harmoniques, et la différence entre les sons rendus provient uniquement de ce fait, que dans les divers cas des sons différents ont été renforcés par la résonnance de la bouche. Donders a prouvé le premier que la bouche résonne d'une manière différente pour les différentes voyelles.

En conservant le même son fondamental, par l'addition d'autres tons, nés des variations d'intensité, soit du ton fondamental, soit d'un ou de plusieurs de ses harmoniques, nous pouvons changer la qualité du son, et il n'est pas douteux que les divers timbres de la voix humaine sont dus à des additions ou à des modifications de ce genre. Ohm avait affirmé, et M. Helmholtz a démontré expérimentalement que chaque son, quelque compliqué qu'il soit, est toujours le résultat de la superposition d'une série limitée de tons simples, en commençant par le ton fondamental, ou le plus grave des tons composants du son, et s'élevant successivement à d'autres tons dont les vitesses de vibration sont des multiples de celle du ton fondamental. Appelons premier ton le ton fondamental, et second, troisième, quatrième, cinquième ton, etc., les tons dont les vitesses de vibration sont successivement doubles, triples, etc., de la vitesse du premier. Cette convention nous permettra de définir avec plus de clarté la manière dont les sons se mêlent dans la production des sons des voyelles.

Pour la production du son OU, il faut porter les lèvres en avant de manière à rendre la cavité de la bouche aussi profonde que possible, et son ouverture très-petite. Cette disposition correspond à la résonnance la plus grave dont la bouche soit capable. C'est alors le ton fondamental des cordes vocales qui est renforcé, tandis que les tons plus élevés sont refoulés dans l'ombre. Cependant, le son OU est un peu mieux rendu, quand un faible troisième ton se mêle au ton fondamental.

L'émission de la voyelle O exige que la bouche soit juste assez ouverte pour que le ton fondamental soit accompagné de son octave très-intense. L'addition, à un très-faible degré, du troisième et du quatrième ton est avantageuse, mais non pas nécessaire.

La voyelle A tire son caractère du troisième ton; le renforcement de ce ton exige que l'orifice de la bouche soit plus grand, et le volume d'air intérieur moindre que dans le cas précédent. Il est bon que le second ton se joigne au troisième avec une intensité modérée; le troisième et le quatrième faibles interviendraient avec avantage.

Pour produire la voyelle É, le son fondamental doit être faible, le second ton comparativement fort, le troisième très-faible ; mais le quatrième, qui est caractéristique de cette voyelle, doit être intense. On peut lui ajouter le cinquième ton modéré. Il n'y a pas de changement essentiel dans le caractère du son, lorsque le troisième et le cinquième tons sont absents. Si l'on veut donner toute leur puissance aux tons qui caractérisent le son-voyelle É, on doit restreindre l'ouverture de la cavité buccale.

Dans la production du son *Ah!* les harmoniques les plus élevés jouent le principal rôle; le second peut être totalement absent, et le troisième très-faible. Les tons supérieurs à ceux-là, particulièrement le cinquième et le septième, doivent intervenir avec une certaine force.

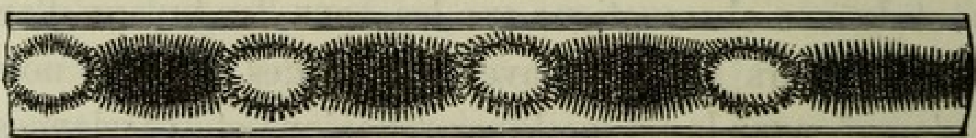
Ces exemples éclairent d'un jour suffisant la question des sons-voyelles. En mêlant de diverses manières les couleurs simples du spectre solaire, nous pouvons faire naître de leurs combinaisons une infinité de couleurs composées. Avec le violet et le rouge on produit le pourpre, avec le jaune et le bleu on fait du vert. De même les sons élémentaires peuvent, dans leur mélange, produire toutes les variétés de timbres possibles. Après avoir résolu la voix humaine dans ses tons constituants, M. Helmholtz a su imiter ces tons à l'aide de diapasons, et reproduire, en les combinant, les timbres de toutes les voyelles.

Le mélange des sons harmoniques peut très-facilement induire en erreur dans la détermination du ton fondamental d'un son. Voici un lourd diapason monté sur une grande caisse résonnante, rendant, lorsqu'il est excité, un ton grave et puissant. Pendant qu'il résonne, tenons-nous près de la caisse, et prononçons la voyelle OU, à l'unisson du diapason.

Les battements qui se font entendre lorsque la voix est un peu au-dessus ou au-dessous du ton du diapason annoncent la proximité de l'unisson. Au lieu de prononcer OU, prononçons O; nous entendons encore les battements; ils prouvent que le ton fondamental est resté le même, et cependant il semble que le son de la voix soit plus élévé qu'il ne l'était. Cette élévation plus grande est due, non à l'élévation du ton fondamental, mais à l'addition de son octave supérieure qui forme un des éléments de O, ainsi que M. Helmholtz l'a démontré. La même remarque s'applique encore avec plus de justesse aux autres voyelles. Leur ton plus élevé en apparence a pour raison d'être l'addition de tons plus élevés au même ton fondamental. La voyelle U est une véritable difficulté pour le chanteur d'opéra, dans ses notes élevées. D'autres voyelles, É, par exemple, peuvent encore se faire entendre après que la prononciation de U est devenue complétement impossible.

Ne voulant pas interrompre la chaîne de nos raisonnements et de nos observations sur les sons des tuyaux d'orgues et sur leurs relations avec les verges solides, nous avons réservé pour la fin quelques réflexions et expériences, lesquelles, à la rigueur, auraient dû trouver place dans la première partie de la leçon. Vous avez déjà entendu les divers sons et vous vous êtes familiarisés avec les divers modes de division d'un tube de verre libre à ses deux bouts, et animé de vibrations longitudinales. Vous savez que lorsqu'il rend son ton fondamental, les deux moitiés du tube s'allongent et se raccourcissent dans une succession rapide. Si le tube était bouché à ses deux extrémités, les vibrations du bouchon feraient vibrer l'air intérieur du tube, et si la vitesse du son dans l'air était égale à sa vitesse dans le verre, l'air du tube vibrerait synchroniquement avec le tube lui-même. Mais la vitesse du son dans l'air est beaucoup moindre que sa vitesse dans le verre, et par conséquent le synchronisme entre les deux mouvements vibratoires n'est possible qu'autant que la colonne d'air se divise en segments vibrants de longueurs convenables. Dans un travail de très-grand intérêt, publié récemment par les *Annales de Poggendorff*, M. Kundt, de Berlin, nous a appris le moyen de rendre ces segments visibles. Prenons une quantité suffisante de poudre légère de lycopode, introduisons-la dans ce tube long de 2 mètres, et distribuons-la en secouant sur toute la surface intérieure du tube; une partie de la poudre restera adhérente à la surface du verre. Bouchons le tube à ses extrémités, saisissons-le d'une main par son milieu, ou mieux, fixons-le par son milieu dans un collier fixe, et frottons-le vivement avec un drap mouillé sur une des moitiés de sa longueur. Nous voyons aussitôt la poudre, qui d'abord adhérait à la surface, s'en détacher et tomber au fond, distribuée

Fig. 101.



comme l'indique la figure 101 : cette nouvelle distribution du lycopode nous montre comment la colonne d'air s'est divisée. Chaque nœud est entouré d'un anneau de poussière, tandis qu'entre deux nœuds, c'est-à-dire le long des segments vibrants, la poudre se dispose en stries transversales.

Vous comprenez immédiatement que nous répétons ici, en substance et avec l'air, l'expérience de M. Melde sur les cordes vibrantes. Lorsqu'une corde était trop longue pour vibrer tout entière, elle s'accommodait aux exigences du diapason auquel elle était attachée, en se divisant en segments vibrants. Dans tous les cas, la distance d'un nœud au suivant est la moitié de la longueur de l'onde sonore : combien avons-nous de demi-ondes dans notre tube? Nous en avons seize (la figure en montre seulement quatre). Mais la longueur de notre tube vibrant longitudinalement est aussi la moitié de la longueur de l'onde sonore *dans le verre*. Donc, dans le cas actuel, avec la même vitesse de vibration, la longueur d'une demi-onde dans le verre est seize fois la longueur d'une demi-onde dans l'air. En d'autres termes, la vitesse du son dans le verre est seize fois la vitesse du son dans l'air. Voici donc que, par le seul recours au frottement avec un morceau d'étoffe humide, nous résolvons un problème très-important. Mais, ainsi que l'a montré M. Kundt, ces expériences ne sont pas limitées à l'air. Après avoir introduit un autre gaz quelconque dans le tube, il suffira d'un seul passage du frotteur pour déterminer les vitesses relatives du son dans ce gaz et dans le verre. Quand le tube est rempli d'hydrogène, par exemple, le nombre des segments vibrants est moindre ; il est plus grand quand le tube est plein d'acide carbonique.

De la vitesse connue du son dans l'air combinée avec la longueur de ces segments de poussière, nous pouvons conclure immédiatement le nombre des vibrations exécutées dans une seconde par le tube qui contient la colonne d'air divisée. Saisissant un tube de verre par son milieu, et faisant passer un frotteur humide sur une de ses moitiés, tirons-en ce son aigu. La longueur de chaque segment de poussière dans le tube est de 75 millimètres. Donc la longueur de l'onde sonore aérienne correspondante est de 150 millimètres. Mais la vitesse du son dans l'air, à la température actuelle, est de 341 mètres par seconde ; et cette longueur comprend 2240 de nos ondes sonores. Ce dernier nombre exprime donc la vitesse de vibration correspondante à la note émise par le tube. Au lieu d'amortir les vibrations au milieu du tube, pour en faire un nœud, nous pouvons recourir à une autre de ses subdivisions. Par exemple, si nous le tenons par un point situé à égale distance du milieu et d'une extrémité, et que nous frottions convenablement, nous savons qu'il se divisera en trois segments vibrants séparés par deux nœuds. Nous savons en outre que la note produite dans ce mode de division est l'octave de celle qui correspond à un seul nœud au milieu du tube, parce que les vibrations sont deux fois plus rapides ; si donc nous partageons le tube plein d'air par deux nœuds au lieu d'un, la poudre de lycopode nous révèlera l'existence de trente-deux segments vibrants au lieu de seize. La même remarque s'applique naturellement à tous les gaz.

En opérant sur quatre tubes remplis respectivement d'air, d'acide carbonique, de gaz d'éclairage, d'hydrogène, et les frottant de manière à faire naître deux nœuds, M. Kundt a trouvé que les nombres de segments accusés par la poudre étaient :

Air.	32	segments.
Acide carbonique	40	
Gaz de houille	20	
Hydrogène	9	

Les vitesses du son dans ces gaz sont inversement proportionnelles à ces nombres ; et en prenant pour unité la vitesse dans l'air, elles seront exprimées par les fractions suivantes :

Acide carbonique. . . $\frac{32}{40} = 0,8.$

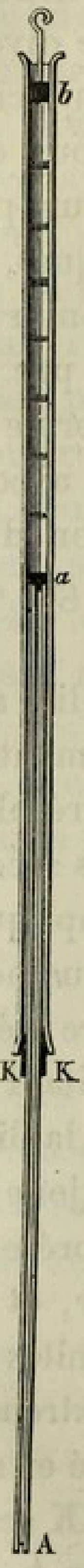
Gaz de houille . . . . $\frac{32}{20} = 1,6.$

Hydrogène . . . . . $\frac{32}{9} = 3,56.$

Si vous vous reportez au tableau de la première leçon, vous verrez que Dulong, par une méthode tout à fait différente, avait trouvé pour la vitesse du son dans l'acide carbonique 0,97, et dans l'hydrogène 3,80, en prenant aussi pour unité la vitesse dans l'air. Les nombres de Dulong étaient déduits des sons que rendaient des tuyaux d'orgue remplis de divers gaz; et voici que, par un procédé d'une extrême simplicité, nous arrivons à des résultats qui approchent beaucoup des précédents. Des tubes dans lesquels on a introduit un peu de poudre légère, qu'on a remplis de gaz quelconques, et scellés ensuite à leurs deux bouts, peuvent être conservés indéfiniment. Il suffit d'un instant pour distribuer par de légers chocs la poudre à la surface intérieure sous forme de couche mince adhérente, et d'un simple frottement avec le drap humide, pour produire le mode de division d'où l'on conclut immédiatement la vitesse du son dans le gaz qui remplit le tube.

Savart trouva qu'il se forme une ligne nodale en hélice autour d'un tube ou d'une verge qui vibre longitudinalement, et Seebeck a démontré que cette ligne héliçoïdale est le résultat non des vibrations longitudinales, mais de vibrations secondaires transversales. Or, cette ligne nodale tend à compliquer la distribution de la poudre dans les expériences que nous venons de répéter. Il faudrait donc opérer de manière à éviter sa formation; M. Kundt y est parvenu, en excitant les vibrations longitudinales dans un tube, et produisant la division en segments ventraux dans un autre tube qui joue au sein du premier le rôle d'un piston. La figure 102 représente un tube de verre d'environ 2 mètres de longueur, et de 5 centimètres de diamètre intérieur. Une des extrémités du tube est fermée par un bouchon mobile *b*. L'autre extrémité KK est aussi fermée par un bouchon de liége traversé en son centre par un tube plus étroit A*a*, que le bouchon KK serre fortement en son milieu. L'extrémité du tube intérieur A*a* est également fermée par un bouchon avec saillie, *a*, remplissant presque le grand tube, et pouvant néanmoins s'y mouvoir assez librement pour que le frottement contre les parois n'ait pas d'influence sur les vibrations du tube-bouchon. La surface intérieure entre *a* et *b* étant légèrement saupoudrée de lycopode, on passe le drap mouillé sur AK, et aussitôt la poudre contenue dans l'intervalle *ab* se distribue sur un certain nombre de segments vibrants. Lorsque la longueur de la colonne d'air *ab* est égale à celle du tube de verre A*a*, le nombre des segments vibrants est de 16. Lorsque, comme dans la figure, *ab* n'est que la moitié de A*a*, il n'y a que 8 segments vibrants.

Fig. 102.



Vous voyez, sans qu'on ait presque besoin de le dire, que ce mode d'expériences peut recevoir une grande extension. Au lieu du tube de verre A*a*, nous pouvons employer une verge de toute autre substance solide, de bois ou de métal, par exemple, et déterminer ainsi la vitesse relative du son dans les corps solides et dans l'air. Remplaçons le tube de verre par une verge de cuivre de même longueur, et en frottant une de ses moitiés avec un drap saupoudré de colophane, déterminons la division de la colonne en un certain nombre de segments correspondant aux vitesses de vibration propres de la verge. M. Kundt a opéré sur le laiton, l'acier, le verre et le cuivre, et ses résultats prouvent que la méthode comporte une grande exactitude. Prenant toujours pour unité la vitesse du son dans l'air, il a obtenu pour la vitesse du son dans le laiton les nombres suivants, déduits de trois séries d'expériences :

1re	10, 87
2e	10, 87
3e	10, 86

L'accord de ces résultats est extraordinaire. Pour mieux faire sentir quelle peut être la précision de cette méthode, ajoutons que la longueur mesurée de chacun des segments recouverts de poudre a été trouvée comprise, dans une série de vingt-sept expériences, entre 43 et 44 millimètres, sans s'élever jamais au-dessus de 44, ni descendre jamais au-dessous de 43. La longueur de la verge métallique, comparée avec celle de l'un des segments mesurés avec une exactitude si grande, nous donne d'un seul coup la vitesse du son dans le métal, comparée à la vitesse du son dans l'air.

Trois expériences distinctes, exécutées de cette manière, ont donné les vitesses suivantes dans l'acier, celle dans l'air étant 1 :

1re	15, 34
2e.	15, 33
3e.	15, 34

L'accord est aussi parfait que dans le cas du laiton.

Le nouveau mode d'expérience, appliqué au verre, donne

15,25[1].

Enfin, dans le cuivre on a trouvé la vitesse du son égale à

11,96.

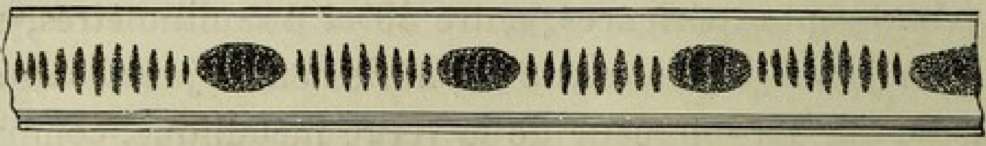
Ces résultats diffèrent à peine de ceux auxquels on est arrivé par d'autres méthodes. Wertheim, par exemple, a trouvé pour la vitesse du son dans un fil d'acier 15,108; M. Kundt l'a trouvée égale à 15,34. Wertheim donne pour la vitesse dans le cuivre 11,17, et M. Kundt 11,96. Les différences n'excèdent pas celles qu'on peut attribuer à des différences dans la composition des substances expérimentées.

La colonne d'air peut ne pas être un multiple exact de la longueur d'onde correspondante à la vitesse de vibration de

[1] La vitesse du son dans le verre dépend de la qualité du verre; le résultat de chaque expérience ne se rapporte donc qu'à l'espèce de verre sur laquelle on opère.

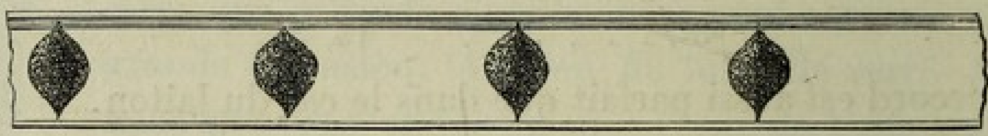
la verge. Dans ce cas, les segments de poudre prennent la forme indiquée par la figure 103. Mais si, à l'aide d'un bou-

Fig. 103.



chon, on fait que la colonne d'air soit un multiple exact de la longueur d'onde, la poudre abandonne entièrement les segments vibrants, et forme, comme dans la figure 104, de petits tas isolés à chaque nœud. Et ici se présente une difficulté. L'extrémité fermée *b* du tube de la figure 102 est

Fig. 104.



naturellement un point de non-vibration, où dans tous les cas il se dépose un amas nodal de poussière ; or toutes les fois que la colonne d'air était un multiple exact de la longueur d'onde, M. Kundt a trouvé qu'il se formait un amas de poussière près de l'extrémité *a* de la verge. De sorte que le point duquel toutes les vibrations semblent émaner serait lui-même un lieu de non-vibration.

Cette difficulté a été signalée par M. Kundt, mais il n'essaya pas de la résoudre. Dans la troisième leçon nous avons eu occasion de constater qu'un nœud, rigoureusement parlant, n'est pas un point de non-vibration, mais seulement un point de vibration minimum, et que, par l'accumulation des petites pulsations que le nœud permet, il peut se former des vibrations d'une grande amplitude. Les extrémités du tube de M. Kundt sont de ces points de vibration minimum, et les longueurs des segments vibrants sont telles que, par la coïncidence des impulsions directes ou réfléchies, l'air qui se trouve à une distance de l'extrémité du tube égale à un demi-segment-ventre vibre avec beaucoup plus de force que l'air à cette même extrémité. La superposition de ces impulsions est plus complète lorsque la colonne d'air est un multiple exact de la longueur d'onde, et pour cette raison les vibrations deviennent alors assez intenses pour balayer complétement la poussière qui couvrait les segments-ventres. Cette explication est confirmée par les expériences de M. Melde, dans lesquelles les diapasons, sources de tous les mouvements produits, sont eux-mêmes des nœuds.

Une expérience de M. Helmholtz peut ici recevoir une application intéressante. Tenant en main un diapason qui exécute 512 vibrations par seconde, tendons entre deux chevalets la corde du sonomètre de la troisième leçon, et posons sur cette corde le pied en fer du diapason, vous n'entendez aucun renforcement du son du diapason ; la corde ne cesse pas d'être silencieuse. Mais promenons le diapason le long de la corde, et dès que nous serons arrivé à la division 33, elle rendra un son éclatant. Avec son degré actuel de tension, la longueur correspondante à 33 vibre synchroniquement avec le diapason. En conséquence, par l'intermédiaire de la corde, le diapason devient capable de communiquer ses vibrations au sonomètre, et par le sonomètre à l'air environnant. Aussi longtemps que nous laisserons le diapason en ce point, et qu'il continuera de vibrer, le son de la corde ne cessera pas de se faire entendre. Le moindre déplacement du diapason à gauche ou à droite de cette division 33 amène la cessation soudaine du son de la corde. Tendons davantage la corde au moyen de la clef. Le son qu'elle rend disparaît encore, et il faudra sans doute une longueur plus grande de corde plus tendue pour répondre à la provocation du diapason. Déplaçons en effet le diapason, faisons-le coïncider avec la division 35, et le son de la corde retentira de nouveau. Tendons plus encore, le son aura sa plus grande puissance quand le diapason sera à 40. Relâchons maintenant la corde, et nous serons forcé de la raccourcir pour qu'elle réponde au diapason. Rapprochant, en effet, le point de contact de l'extrémité de la corde, nous entendrons le son surgir à la division 25. Si nous reportons le diapason à 35, nous n'entendons plus rien; mais si en tournant la clef lentement nous déplaçons peu à peu ce que nous pouvons appeler le point de synchronisme, il finira par coïncider avec le diapason, et aussitôt le sonomètre rendra un son éclatant. Dans tous les cas, un peu avant que le point soit exactement atteint, tout à fait dans son voisinage, on entend des *battements* produits, comme nous le verrons plus tard, par la superposition du son du diapason à celui de la corde, alors qu'ils sont presque à l'unisson, sans l'être parfaitement.

Dans toutes ces expériences, lorsque la longueur du fil métallique comprise entre le diapason et le chevalet est celle qui convient au synchronisme, les vibrations du diapason se communiquent par le fil à la caisse du sonomètre, qui les transmet à l'air environnant. Et toujours le point de la corde sur lequel appuie le diapason est un nœud. Ce point représente l'extrémité relativement fixe d'une corde dont les vibrations sont synchrones avec celles du diapason. Ce cas est complétement celui de la main qui tenait le tube de caoutchouc, ou du diapason dans l'expérience de M. Melde. C'est encore un effet de même nature que celui observé par M. Kundt, lorsqu'il trouvait que l'extrémité de la colonne d'air en contact avec sa verge vibrante était un nœud, et non le milieu d'un segment vibrant.

APPENDICE RELATIF A LA RÉSONNANCE

Tout le monde connaît la résonnance des cavernes et des anfractuosités des rochers. M. Bunsen mentionne le son, comparable aux roulements du tonnerre, que produit un des célèbres jets de vapeur de l'Islande, lancé à l'entrée d'une caverne. La plupart des touristes de la Suisse ont remarqué le bruit assourdissant produit par la chute de la Reuss, au Pont-du-Diable : le bruit renforcé de la cascade prend l'intensité du bruit du tonnerre. Le son que fait entendre une coquille marine dont on applique l'ouverture contre l'oreille est encore un cas de résonnance. Les enfants s'imaginent qu'ils entendent ainsi le son de la mer. Ce bruit a sa véritable cause dans le renforcement des sons faibles qui traversent en tous sens l'atmosphère la plus tranquille. En faisant usage de tubes de différentes longueurs, on constate immédiatement que la résonnance varie avec la longueur du tube. Le conduit de l'oreille est lui-même une cavité résonnante. Lorsque, tenant des pinces à feu suspendues par deux cordons, on enfonce dans les oreilles les doigts qui tiennent les cordons, en même temps qu'on frappe le plancher avec les extrémités des pinces, on a la sensation du son grave et retentissant d'un bourdon de cathédrale. Lorsqu'il est ouvert, le conduit de l'oreille résonne à l'unisson de sons dont les nombres de vibration sont de 3000 par seconde. Ce fait a été mis en évidence par M. Helmholtz, et une dame allemande, Mme Seiler, a remarqué que les chiens que la musique fait hurler sont particulièrement sensibles à cette même note.

RÉSUMÉ DE LA LEÇON V.

Lorsqu'un fil métallique tendu est frotté convenablement dans la direction de sa longueur, il entre en vibrations longitudinales : il peut vibrer, soit dans son entier, soit divisé en segments séparés par des nœuds.

Les sons que rend dans ces circonstances le fil métallique suivent l'ordre des nombres 1, 2, 3, 4, etc.

Les vibrations *transversales* d'une verge fixée à ses deux extrémités n'obéissent pas à la même loi que les vibrations transversales d'un fil métallique tendu, parce que les forces mises en jeu ne sont plus les mêmes, comme on l'a expliqué dans la quatrième leçon. Mais les vibrations longitudinales d'un fil métallique tendu suivent le même ordre que les vibrations longitudinales d'une verge fixée par ses deux bouts, parce que cette fois les forces mises en jeu sont les mêmes, et se réduisent dans les deux cas à l'élasticité de la matière.

Une verge fixée par un bout vibre longitudinalement dans son ensemble, ou se divise en deux, trois, quatre, etc., segments vibrants, séparés par des nœuds. L'ordre des tons de la verge est celui des nombres impairs 1, 3, 5, 7, 9, etc.

Une verge libre à ses deux bouts peut aussi vibrer longitudinalement. Sa note la plus basse correspond à sa division en deux parties séparées au centre par un nœud. Les tons harmoniques de cette verge correspondent à sa division en trois, quatre, cinq, etc., parties vibrantes, séparées par deux, trois, quatre, etc., nœuds. La série des tons est celle des nombres 1, 2, 3, 4, 5, etc.

Nous pouvons aussi exprimer cette succession en disant que, tandis que les tons d'une verge fixée par les deux bouts suivent l'ordre des nombres impairs, les tons d'une verge libre à ses deux bouts suivent l'ordre des nombres pairs 2, 4, 6, 8, etc.

Aux points de vibration maximum, la verge ne change pas de densité ; aux nœuds, au contraire, les changements de densité atteignent leur maximum. Ce fait se démontre par l'action de la verge sur la lumière polarisée.

Les colonnes d'air de longueurs déterminées résonnent ou sont sensibles à des diapasons de tons déterminés.

La longueur de colonne d'air fermée à un bout, qui résonne le mieux à l'unisson d'un diapason donné, est le quart de la longueur de l'onde sonore produite par ce diapason.

Cette résonnance est due au synchronisme entre les périodes de vibrations du diapason et de la colonne d'air.

En soufflant transversalement à l'ouverture d'un tube fermé à l'autre bout, on détermine un frémissement de l'air, un mélange de pulsations, dont une peut, par la résonnance du tube s'élever à la condition de son musical.

On obtient le même son en plaçant devant l'ouverture du tube un diapason dont la vitesse de vibration est celle du tube.

Lorsqu'un tube fermé par un bout, un tuyau d'orgue fermé, par exemple, sonne sa note la plus basse, la colonne d'air intérieur n'est divisée par aucun nœud. Les tons harmoniques de la colonne correspondent à des divisions de sa longueur, analogues à celles d'une verge fixée par un bout et vibrant longitudinalement. La série de ces tons est celle des nombres impairs 1, 3, 5, 7, etc. C'est une conséquence nécessaire du mode de division de la colonne.

Dans les tuyaux d'orgue, on produit l'agitation de l'air en faisant arriver par une fente étroite un courant d'air sur un bord tranchant. Parmi les pulsations nées de ce choc, il en est une dont la résonnance du tube fait un son musical.

Lorsque l'agitation de l'air est remplacée par les vibrations d'un diapason placé devant l'embouchure du tuyau d'orgue, et dont la vitesse de vibration est convenable, le tuyau parle ou répond au diapason. Dans la pratique, le tuyau d'orgue crée lui-même virtuellement son diapason, en forçant la lame d'air qui a pénétré dans l'embouchure à vibrer en périodes synchroniques avec les siennes.

Un tuyau d'orgue ouvert rend une note plus haute d'une octave que celle d'un tuyau fermé de même longueur. Ce rapport est une conséquence nécessaire des modes respectifs de division des colonnes d'air.

Lorsque, par exemple, un tuyau d'orgue fermé sonne sa note la plus basse, la colonne d'air, ainsi qu'on l'a vu, n'est pas divisée, elle reste entière. Au contraire, lorsqu'un tuyau ouvert sonne sa note la plus basse, la colonne est divisée par un nœud en son milieu. Dans ce cas, le tuyau ouvert est formé virtuellement de deux tuyaux fermés ayant une base commune. La note d'un tuyau ouvert doit donc être celle d'un tuyau fermé ayant la moitié de sa longueur.

La longueur d'un tuyau fermé est le quart de celle de l'onde sonore qu'il produit, tandis que la longueur d'un tuyau ouvert est la moitié de celle de son onde sonore.

La série des tons d'un tuyau ouvert est celle des nombres pairs 2, 4, 6, 8, etc., ou de la suite naturelle des nombres 1, 2, 3, 4, etc.

Dans les deux sortes de tuyaux, le nombre des vibrations exécutées dans un temps donné est inversement proportionnel à la longueur du tuyau.

Les lieux de vibration maximum, dans les tuyaux d'orgues, sont des lieux de variation minimum de densités, tandis que les lieux de vibration minimum sont ceux où les variations de densité atteignent leur maximum.

Les vitesses du son dans les gaz, les liquides et les solides peuvent se conclure des tons produits par des longueurs égales de ces divers corps, ou par les longueurs de ces corps qui donnent des sons identiques.

Les anches, ou languettes vibrantes, sont souvent associées à des colonnes d'air sonores. Ce sont des lames posées à plat sur un orifice rectangulaire, et qui, par leurs mouvements de va-et-vient, rendent intermittent le courant d'air qui passe par l'orifice.

L'action de l'anche est identique avec celle de la sirène.

Les anches de bois flexible, quelquefois associées aux tuyaux d'orgues, sont forcées de vibrer à l'unisson de la colonne d'air du tuyau; d'autres anches ont trop de raideur pour être ainsi gouvernées par l'air en vibration. Dans ce dernier cas, la colonne d'air doit avoir la longueur qu'exige le synchronisme de ses vibrations avec celles de l'anche.

En associant aux anches des tuyaux convenables, on donne à leurs tons les qualités de la voix humaine.

Chez l'homme, l'organe de la voix est un instrument à anche; l'anche dans ce cas est formée de bandes ou cordes élastiques placées au sommet de la trachée-artère, et dont la tension est variable.

La vitesse de vibration des cordes vocales n'est pas réellement influencée par la résonnance de la bouche; mais la bouche, en modifiant sa forme et ses dimensions, peut arriver à résonner à l'unisson du son fondamental ou de l'un quelconque des sons harmoniques des cordes vocales.

Le renforcement de quelques-uns de ces sons en particulier, par la résonnance de la bouche, peut altérer le timbre de la voix.

Les différents sons-voyelles résultent de la différence des mélanges du son fondamental avec les tons harmoniques des cordes vocales.

Lorsqu'on fait vibrer longitudinalement la substance même d'un tube fermé par un bout ou par les deux bouts, l'air intérieur est mis aussi en vibration.

En saupoudrant d'une poudre légère la surface intérieure du tube, on rend visibles les segments dans lesquels la colonne d'air se divise. De la division de cette colonne, on peut conclure la vitesse du son dans la substance du tube comparée avec sa vitesse dans l'air.

On peut substituer à l'air d'autres gaz, et déterminer ainsi la vitesse du son dans ces gaz, comparée à sa vitesse dans l'air.

L'extrémité d'une verge vibrant longitudinalement peut déterminer l'agitation de la colonne d'air contenue dans un tube, et forcer l'air à se diviser en segments vibrants. Ces segments peuvent être rendus visibles au moyen de poudres légères, et il est possible d'en conclure la vitesse du son dans la verge vibrante, comparativement avec sa vitesse dans l'air.

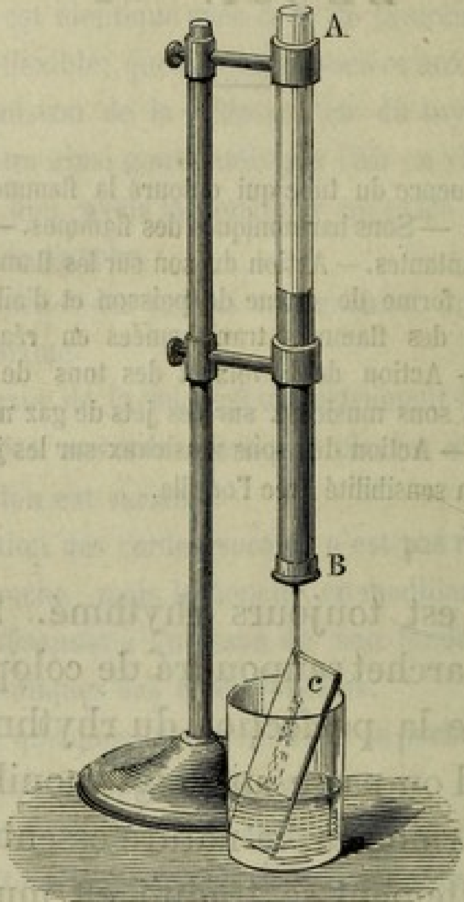
Par l'application de cette méthode, on peut obtenir la vitesse du son dans toute substance solide susceptible de prendre la forme d'une verge et de vibrer longitudinalement.

LEÇON VI

Flammes sonores. — Influence du tube qui entoure la flamme. — Influence des dimensions de la flamme. — Sons harmoniques des flammes. — Effet des tons à l'unisson sur les flammes chantantes. — Action du son sur les flammes nues. — Expériences sur les becs de gaz en forme de queue de poisson et d'ailes de chauve-souris. — Prodigieuse sensibilité des flammes transformées en réactifs acoustiques. — La flamme des voyelles. — Action de la voix et des tons de la conversation sur les flammes. — Action des sons musicaux sur les jets de gaz non enflammés. — Constitution des jets d'eau. — Action des sons musicaux sur les jets d'eau. — Une veine liquide peut rivaliser en sensibilité avec l'oreille.

Le frottement est toujours rhythmé. Si nous passons sur une corde un archet saupoudré de colophane, la tension de la corde assure la perfection du rhythme produit par le frottement. Quand on passe un doigt mouillé sur les bords des verres de l'harmonica, la nature essentiellement rhythmique de leur frottement se traduit en musique agréable à l'oreille. Les expériences de Savart démontrent que le frottement d'un liquide contre les bords de l'orifice par lequel il s'écoule est apte à produire des sons musicaux. Nous avons ici ce qui est nécessaire pour répéter une de ses expériences. Le tube AB (*fig.* 106) a été rempli d'eau, et son extrémité B est fermée par une plaque de laiton, percée à son centre d'un orifice circulaire dont le diamètre est égal à l'épaisseur de la plaque. J'enlève une cheville qui bouche l'orifice, l'eau s'écoule, et à mesure qu'elle s'abaisse dans le tube il se produit une note musicale d'une grande douceur, engendrée par la colonne liquide. Cette note mélodieuse est due aux intermittences de l'écoulement, qui ont pour effet d'animer la colonne entière d'un mouvement de vibration. On voit se dessiner une tendance à la production de ce mouvement vibratoire dans les rides circulaires que fait naître autour du

Fig. 106.



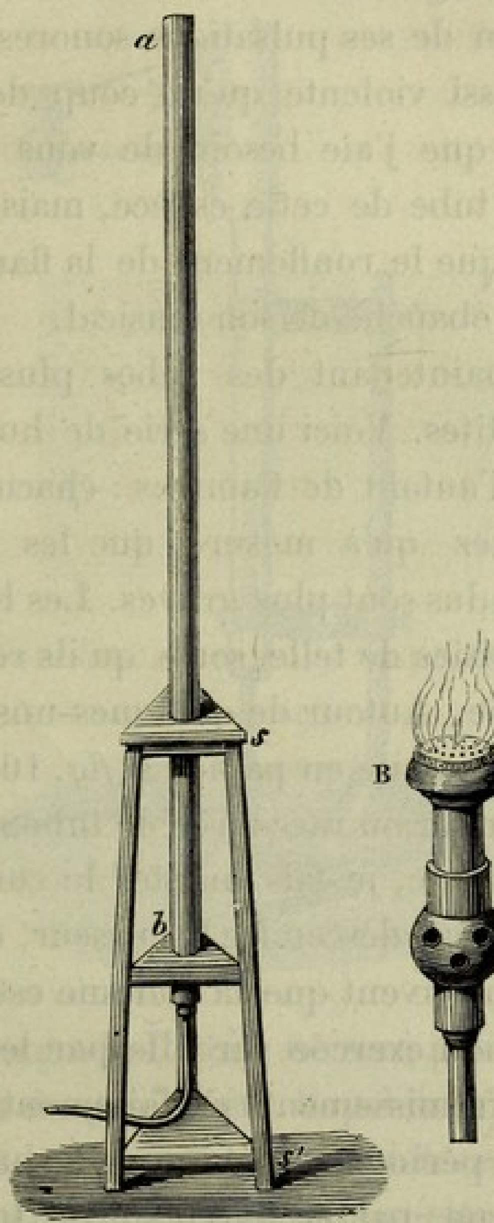
centre de la tasse le filet de thé qui coule du col étroit de la théière. Ce même effet d'intermittence se manifeste dans les anneaux de fumée noire qui s'élancent par succession rhythmée ou cadencée de la cheminée des bateaux à vapeur. Le bruit désagréable d'une machine mal graissée est une manifestation du fait que le frottement n'est plus uniforme, que les surfaces frottantes grippent et ne grippent pas d'une manière alternative et irrégulière.

Si nous considérons le frottement des gaz, nous y retrouverons ce même caractère d'intermittence. La balle de fusil siffle en traversant l'air dans sa course rapide. Le frottement du vent contre les tiges et les branches des pins fait naître un bruit qui rappelle celui des cascades. Faites traverser vivement l'air par une bougie bien allumée; les dentelures du ruban lumineux suivant lequel elle s'épanouit sont la conséquence et la preuve visible de l'intermittence, et le son presque musical qui accompagne l'apparition de la bande dentelée en est l'expression acoustique. D'un autre côté, si vous soufflez doucement sur une bougie sans l'éteindre, le son tremblotant qui résulte de l'agitation de la flamme dénote encore une action rhythmée. Nous avons déjà vu ce qu'on peut obtenir en associant un tube à de l'air ainsi agité. Nous savons que le tube choisit la pulsation spéciale qui lui convient, et la transforme par résonnance en un son musical. Pareille chose peut se produire avec le bruit de la flamme. Qu'on introduise, par exemple, dans un tube de diamètre et de longueur convenables, la flamme de la lampe d'émailleur de notre laboratoire, et ses mouvements confus se résoudront en un *bourdonnement musical*. La pulsation particulière d'abord choisie par le tube réagit sur la flamme de manière à éteindre jusqu'à un certain point les autres pulsations, forçant la flamme à vibrer synchroniquement avec elle. Cette réaction peut être assez puissante, les chocs rhythmés des pulsations peuvent s'accumuler ou s'ajouter assez pour devenir capables de causer l'extinction de la flamme, lors même que son volume et son activité sont considérables.

Il n'est pas nécessaire, pour produire cette agitation, de mettre en jeu une action extérieure. Lorsqu'un bec de gaz enflammé est entouré d'un tube, au sein duquel il plonge, la circulation intérieure de l'air suffit ordinairement pour produire le mouvement rhythmé indispensable, et amener spontanément la flamme à chanter. On ne s'imaginerait pas quel degré d'intensité cette musique des flammes peut atteindre. Voici un bec circulaire, percé de vingt-huit orifices pour la sortie du gaz. Je place au-dessus de sa flamme ce tube de fer-blanc long de 15 décimètres et large intérieurement de 63 millimètres. La flamme frémit d'abord et semble inquiète, mais elle a bientôt imposé à ses pulsations incertaines une périodicité parfaite, et il en résulte un son musical clair et retentissant. La rapidité des pulsations dépend, dans une certaine mesure, des dimensions de la flamme ; en diminuant la quantité de gaz, je fais cesser le son que la flamme rend actuellement. Mais après un moment de silence, la flamme rend un nouveau son qui est précisément l'octave du premier. Le premier était le son fondamental du tube qui entoure la flamme, le second est le premier harmonique de ce même tube. Ici, en effet, comme dans le cas des tuyaux d'orgue ouverts, la colonne d'air intérieur se divise en segments vibrants séparés les uns des autres par des nœuds.

Permettez-moi d'essayer devant vous l'effet de ce grand tube *ab* (*fig.* 107), qui n'a pas moins de 45 décimètres de longueur, de 10 centimètres de diamètre, construit d'ailleurs pour un tout autre usage. Il est porté par un trépied *ss'*, et l'on y a introduit un large bec ou brûleur de gaz, représenté sur une plus grande échelle en B. Vous entendez le frémissement préliminaire; maintenant, c'est un son d'une très-grande puissance. Augmentons la hauteur de la flamme, l'action devient de plus en plus violente; bientôt c'est un véritable ouragan musical qui sort du tube. Mais voici que le vacarme a cessé subitement, les pulsations de la flamme ont réagi sur elle, et, ne pouvant résister à la violence du choc, elle s'est éteinte. Rallumons-la et faisons-la très-petite. Remise au sein du tube, elle chante de nouveau, mais c'est un des sons harmoniques du tube qu'elle fait entendre. En ouvrant entièrement le robinet, je donne au gaz son plein essor, et le son s'arrête, tout rentre dans le silence pour un instant; mais c'est une tempête qui couve et qui, comme dans la première expérience, éclate bientôt ; c'est encore une sorte d'ouragan de son. En diminuant la flamme, on fait disparaître le

Fig. 107.



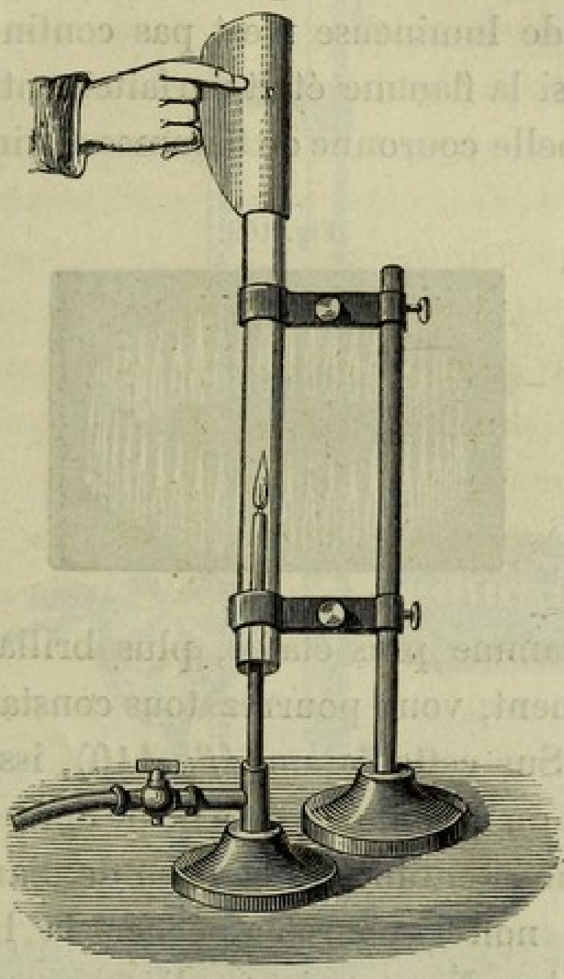
son fondamental, et l'on entend le premier harmonique du tube. Rendons la flamme encore plus petite, le premier harmonique est remplacé par le second. Vos oreilles, étant devenues habiles à saisir les sons, je donne de nouveau au gaz son plein essor. Vous reconnaissez mêlés au son fondamental ses harmoniques ; on dirait une lutte dans laquelle chacun de ces sons s'efforce de dominer le bruit général.

Avec un grand bec à gaz de Bunsen, en pomme d'arrosoir, le son de ce tube devient assez fort pour ébranler le parquet, les meubles de cette salle, mes nombreux auditeurs eux-mêmes sur leurs siéges; et l'extinction de la flamme, résultat de la réaction de ses pulsations sonores, s'annonce par une explosion aussi violente qu'un coup de pistolet. Vous comprenez, sans que j'aie besoin de vous le dire, qu'une cheminée est un tube de cette espèce, mais de proportions plus grandes, et que le ronflement de la flamme dans l'âtre est une grossière ébauche de son musical.

Considérons maintenant des tubes plus courts et des flammes plus petites. Voici une série de huit tubes; je les place au-dessus d'autant de flammes : chacun d'eux chante, et vous remarquez qu'à mesure que les tubes sont plus longs les sons rendus sont plus graves. Les longueurs de ces tubes ont été choisies de telle sorte qu'ils rendent les huit notes de la gamme. Autour de quelques-uns vous voyez un curseur ou tuyau mobile en papier *s* (*fig.* 108), à l'aide duquel on peut allonger ou raccourcir le tube sonore. Pendant que la flamme chante, je fais monter le curseur, et le ton baisse aussitôt. Je fais descendre le curseur, et le ton s'élève. Ces expériences prouvent que la flamme est gouvernée par le tube. La réaction exercée sur elle par les pulsations réfléchies rend ses frémissements parfaitement périodiques, et la longueur de la période est déterminée, comme dans le cas des tuyaux d'orgue, par la longueur du tube.

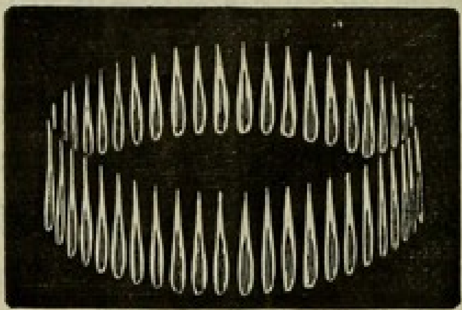
Les étoiles fixes, surtout celles voisines de l'horizon, ont une lumière vacillante dont la couleur varie quelquefois dans l'acte de ce qu'on appelle leur scintillation. J'ai souvent observé la nuit, sur les plateaux des Alpes, les éclairs alternatifs de rubis et d'émeraude qui jaillissaient des étoiles les plus brillantes et les moins élevées au-dessus de l'horizon. Placez un miroir dans une position telle que vous puissiez y voir l'image d'une de ces étoiles, et faites-le tourner rapidement à droite et à gauche; la ligne lumineuse

Fig 108.



formée par l'image de l'étoile ne sera pas continue; elle formera un ruban de grains de chapelet ou de perles colorées d'une extrême beauté. Vous obtiendrez le même effet si vous regardez l'étoile avec une lorgnette d'opéra que votre doigt anime d'un mouvement oscillatoire. Cette expérience nous apprend que, dans l'acte de la scintillation, la lumière de l'étoile est éteinte par intervalles successifs, les espaces obscurs qui séparent les grains brillants correspondant aux périodes d'extinction. Or, nos flammes sonores sont aussi des flammes scintillantes. Lorsqu'elles commencent à chanter elles sont agitées d'un frémissement sensible, qu'il est facile d'analyser par le mouvement d'un miroir ou d'une lorgnette, comme dans le cas d'une étoile[1]. Je regarde, en effet, la flamme avec cette petite lorgnette, à laquelle j'imprime des oscillations telles que l'image décrive un cercle entier; la bande lumineuse n'est pas continue comme elle devrait l'être si la flamme était parfaitement stable; elle se résout en une belle couronne de flammes distinctes (*fig.* 109).

Fig. 109.

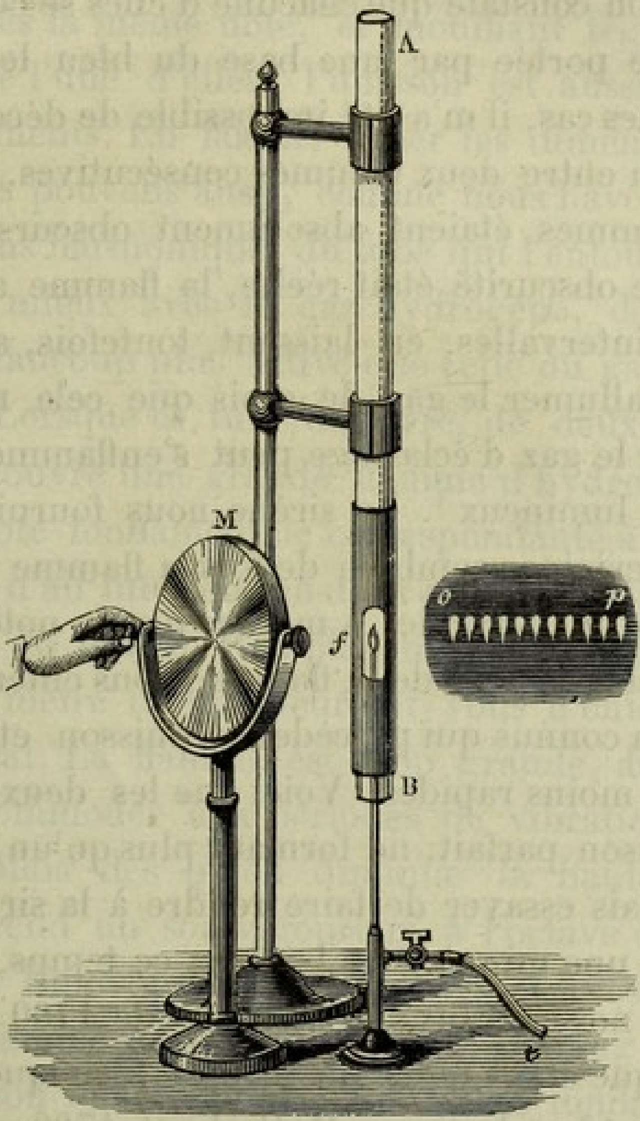


Avec une flamme plus étalée, plus brillante, et vibrant moins rapidement, vous pourrez tous constater cette action intermittente. Sur cette flamme (*fig.* 110), issue d'un bec de gaz, on a placé un tube de verre AB, de deux mètres de longueur, et de cinq centimètres environ de diamètre. Le tube est en partie noirci pour empêcher la lumière de la flamme de tomber directement sur l'écran, qu'il convient de maintenir aussi obscur que possible. En face du tube, on a dressé un miroir concave M, qui projette sur l'écran une image agrandie de la flamme. En tournant le miroir avec la main, on peut faire courir l'image sur l'écran. Si la flamme était silencieuse et fixe, nous obtiendrions une bande lumineuse *continue;* mais la flamme est dans un état d'agitation qui se traduit par un son retentissant : aussi, en faisant osciller le miroir, nous obtenons, au lieu d'une bande continue, une série d'images distinctes *op*, formant un chapelet lumi-

[1] Cette expérience a été faite sur la flamme d'hydrogène, pour la première fois, par M. Wheatstone.

neux. Si le miroir oscille plus vite, les images laissent entre elles de plus grands intervalles ; s'il oscille plus lentement,

Fig. 110.



les images se rapprochent, et le chapelet de flammes peut ainsi passer par une série de variantes très-belles. J'applique ma main contre l'extrémité inférieure B du tube, de manière à intercepter le courant d'air qui déterminait les vibrations de la flamme, et les oscillations du miroir ne font plus naître qu'une bande continue. Voyez avec quelle soudaineté cette bande lumineuse se résout en une série d'images distinctes, aussitôt que je retire ma main et que le courant d'air passe de nouveau sur la flamme.

Si l'on examine attentivement, avec l'aide du miroir tournant, une petite flamme chantante de gaz d'éclairage, ou plutôt la série discontinue des images de la flamme projetée sur l'écran, on constate que chacune d'elles se compose d'une pointe jaune portée par une base du bleu le plus riche. Dans quelques cas, il m'a été impossible de découvrir aucun trait d'union entre deux flammes consécutives. Les espaces entre les flammes étaient absolument obscurs pour l'œil. Mais, si cette obscurité était réelle, la flamme aurait dû s'éteindre par intervalles, en laissant, toutefois, assez de chaleur pour réallumer le gaz. Je crois que cela n'est pas impossible, car le gaz d'éclairage peut s'enflammer au contact d'un air non lumineux [1]. La sirène nous fournit un moyen facile de déterminer combien de fois la flamme s'éteint et se rallume dans une seconde. A mesure que la note de l'instrument approche de celle de la flamme, vous entendez ces battements bien connus qui précèdent l'unisson et deviennent de moins en moins rapides. Voici que les deux notes résonnent à l'unisson parfait, ne formant plus qu'un seul courant sonore. Je vais essayer de faire rendre à la sirène le même son pendant une minute. Au bout de ce temps, je vois, enregistré sur nos cadrans, un nombre de 1700 révolutions. Mais, le disque étant percé de 16 trous, chaque révolution correspond à 16 pulsations. Multipliant 1700 par 16, nous trouvons 27200 pour le nombre des pulsations par minute. C'est aussi le nombre de fois que notre petite flamme s'est éteinte et rallumée pendant la durée de l'expérience, c'est-à-dire qu'elle s'est éteinte et rallumée 453 fois par seconde.

Les flammes chantantes obéissent avec une telle facilité aux actions et réactions des pulsations qui tombent sur elles, qu'elles sont presque entièrement gouvernées par le tube

[1] Un jet de gaz, par exemple, peut être enflammé à douze ou treize centimètres au-dessus du sommet d'une flamme visible, à une distance où une feuille de platine ne devient pas incandescente.

qui les entoure; je dis *presque*, mais non tout à fait. Le ton du son rendu dépend, dans quelque mesure, des dimensions de la flamme. Nous le prouverons facilement, en faisant rendre à deux flammes la même note, et modifiant légèrement les dimensions de l'une d'elles; l'unisson est aussitôt troublé par des battements. En faisant varier les dimensions d'une flamme, nous pouvons aussi, comme nous l'avons déjà vu, obtenir les sons harmoniques du tube qui l'entoure. L'expérience réussit mieux avec le gaz hydrogène, dont la combustion est beaucoup plus active que celle du gaz ordinaire d'éclairage. Lorsque ce tube de verre, de deux mètres de longueur, recouvre une grande flamme d'hydrogène, vous entendez la note fondamentale correspondante à la division de la colonne d'air intérieur en deux segments vibrants, par un seul nœud au milieu. Remplaçons ce tube par un autre qui n'a qu'un mètre de longueur, et vous n'entendez plus de son musical. La flamme est trop grande, de fait, pour pouvoir s'accommoder aux périodes de vibration du tube plus court. Mais dès qu'on diminue la hauteur de la flamme elle rend un son vigoureux, à l'octave de celui du premier tube. Enlevons le tube court, et recouvrons de nouveau la flamme avec le tube long. Ce long tube rend, non plus son son fondamental, mais le son fondamental du tube plus court. Pour s'accommoder aux périodes vibratoires de la flamme raccourcie, la longue colonne d'air se divise comme dans un tuyau d'orgue ouvert qui rend son premier harmonique. On peut faire varier les dimensions de la flamme de manière à obtenir, avec ce même tube, une série de notes dont les vitesses de vibration sont dans le rapport des nombres naturels, 1 : 2 : 3 : 4 : 5, c'est-à-dire le ton fondamental et ses quatre premiers harmoniques.

L'observation des flammes chantantes est déjà ancienne, quoique probablement on ne leur ait jamais donné l'intensité qu'elles ont prise dans nos expériences. En 1777, les sons d'une flamme d'hydrogène furent entendus du docteur Higgins. En 1802, ces sons devinrent l'objet des recherches de Chaldni, qui rappelle une explication inexacte donnée par De Luc. Chladni montra que les sons sont ceux du tube ouvert qui entoure la flamme, et il parvint à obtenir les deux premiers harmoniques. Dans la même année 1802, G. de la Rive fit aussi, dans cette direction, des expériences intéressantes. Ayant introduit un peu d'eau dans la boule d'un tube à thermomètre et l'ayant chauffée, il montra que la condensation périodique de la vapeur d'eau dans la tige du tube pouvait faire naître des sons musicaux d'une force et d'une douceur remarquables. Il attribua, en conséquence, les sons des flammes aux dilatations et condensations alternatives de la vapeur d'eau produite par la combustion. Rien de plus facile que de répéter ses expériences. Plongeant dans la flamme d'une lampe à esprit de vin la boule remplie d'eau d'un thermomètre, et tenant sa tige inclinée, on entend un son dès que l'eau entre en ébullition. Mais, en 1818, Faraday montra que les sons du jet d'hydrogène se produisaient également quand le tube qui entoure la flamme est placé au sein d'un air dont la température dépasse 100°C. Il montra en outre qu'on les obtenait également avec des flammes d'oxyde de carbone, où la vapeur d'eau ne peut assurément jouer aucun rôle.

A partir de ces expériences, la première observation acoustique dont les flammes devinrent l'objet fut celle faite à Berlin, par M. le comte Schaffgotsch. Il montra que lorsqu'une flamme de gaz ordinaire est surmontée d'un tube assez court, une forte voix de fausset, chantant à l'unisson de la note du tube ou de son octave supérieure, faisait trembler et vibrer la flamme. Il arrivait même que la voix éteignait la flamme, lorsque le ton du son rendu par le tube était assez élevé.

Au printemps de 1857, cette expérience vint à ma connaissance, et je voulus aussitôt la répéter. Dans le compte rendu très-sommaire de l'observation, publié dans les *Annales de Poggendorff*, on n'avait nullement indiqué la manière d'opérer; mais en étudiant attentivement les conditions de succès, je constatai un certain nombre d'effets singuliers qui captivèrent fortement mon attention. M. le comte Schaffgotsch poursuivait de son côté ses recherches, et sans nous être concertés, tout à fait à l'insu l'un de l'autre, nous marchions sur le même terrain. Je reconnais toutefois que la priorité de ce qu'il y a de commun dans les expériences que nous faisions alors simultanément appartient à M. le comte Schaffgotsch.

Répétons sa première expérience. Dans ce tube, long de 28 centimètres, vous voyez un petit jet de gaz qui brûle tranquillement. Sa flamme est brillante et silencieuse. J'ai déterminé par une expérience préliminaire la note ou le ton du son que peut rendre ce tube; et, me tenant à quelque distance de la flamme, je fais retentir cette note; la flamme s'agite aussitôt, elle est saisie d'un tremblement visible à tous les yeux. Si nous voulons obtenir l'extinction de la flamme, il faudra recourir à un bec ou brûleur qui ne laisse passer le gaz que par une ouverture très-étroite et sous une pression considérable. La petite flamme qui brûle devant vous est précisément dans ces conditions. En émettant le son du tube qui l'entoure, je la fais trembler. Je donne plus de force à ma voix, et voici que la flamme s'éteint.

La cause du frémissement de la flamme se révèlera mieux si nous répétons l'expérience avec la sirène. Installons-la sur cette soufflerie acoustique à quelque distance d'une flamme chantante, et faisons monter graduellement le ton du son engendré par la sirène. Lorsque ce ton est près d'être à l'unisson de celui de la flamme, et que déjà vous entendez les battements, vous constatez que la flamme s'agite et se met à danser synchroniquement avec les battements. Ces mouvements se ralentissent aux approches de l'unisson ; ils cessent totalement quand l'unisson devient parfait ; ils reprennent dès que la sirène a dépassé l'unisson, et deviennent d'autant plus rapides que le désaccord entre les deux sons est plus grand. Le tremblement de la flamme observé par M. Schaffgotsch n'avait pas une autre cause. La flamme dansait parce que la note du tube qui l'entourait était presque, mais non pas tout à fait, à l'unisson de la voix de l'expérimentateur.

Cette coïncidence exacte des sauts de la flamme et des battements est très-nettement mise en évidence par un diapason qui rend la même note que la flamme. En surchargeant ce diapason d'un petit morceau de cire, de manière à l'écarter un peu de l'unisson ; et le rapprochant, après l'avoir excité, du tube qui contient la flamme chantante, on constate que les battements et les sauts de la flamme sont parfaitement simultanés. Dès qu'on place le diapason au-dessus d'un vase renforçant, tous entendent les battements et voient en même temps la flamme danser synchroniquement. En modifiant la surcharge du diapason, ou en faisant varier légèrement les dimensions de la flamme, on augmente ou l'on diminue sensiblement la durée ou le nombre des battements. Dans tous les cas, les sauts de la flamme arrivent aux yeux en même temps que les battements aux oreilles.

Dans le cours de ces expériences, j'eus un jour l'occasion de constater que lorsque j'élevais convenablement le ton de ma voix, une flamme silencieuse jusqu'alors au sein de son tube commençait à chanter. J'interrompais mon chant ou j'émettais de nouveau la note sensible, plusieurs fois alternativement, la flamme me répondait toujours en chantant à l'unisson. Le même fait avait été observé peu de temps auparavant par M. le comte Schaffgotsch, sans que j'en eusse eu connaissance. Remarquez les conditions de l'expérience. Je recouvre cette flamme d'un tube de 30 centimètres de longueur, de manière qu'elle soit à 3 ou 4 centimètres de distance de l'extrémité inférieure. L'émission de la note convenable fait trembler la flamme, mais ne la fait pas chanter. Je baisse le tube de sorte que la distance de la flamme à l'extrémité inférieure soit de 7 centimètres, et à l'instant même son chant fait explosion. Entre ces deux positions il en est une troisième, telle que la flamme qu'on y place ne rompt pas le silence spontanément, mais telle aussi que quand la flamme a été excitée et comme amorcée par la voix, elle chante et continue indéfiniment à chanter.

Dans cette position particulière, la flamme est apte à chanter, mais elle exige qu'on la mette en train. Elle est en quelque sorte sur le bord d'un précipice, attendant seulement qu'on l'y pousse. Je place la flamme dans la position dont il s'agit; elle reste silencieuse; mais dès que je fais retentir la note convenable, elle tire sa petite langue et entonne son chant. En plaçant mon doigt pour un instant sur l'extrémité inférieure du tube, je fais cesser la musique. M'éloignant alors de la flamme autant que le permettent les dimensions de cette salle, j'ordonne à la flamme de chanter; elle obéit immédiatement. Je lui tourne le dos et je répète l'expérience. Mon corps ne fera pas ombre au son. Les impulsions sonores contournent ma personne, arrivent au tube et provoquent la flamme à chanter. Un tuyau ou tout autre instrument capable d'émettre une note de même ton produirait le même effet.

Plaçons maintenant trois flammes dans trois tubes *a*, *b*, *c*, longs de 25, 30 et 35 centimètres. Les flammes gardent le silence. Faisons agir sur elles le son de la sirène. Le ton de l'instrument s'élève graduellement; le voici presque à l'unisson du son du tube le plus long *c*, et dès qu'il l'atteint il provoque le chant de la flamme que ce tube recouvre. Continuant à s'élever, le ton de la sirène arrive à l'unisson du ton de *b* qu'il fait chanter. Il atteint maintenant le ton de *a* et sa flamme chante comme les deux premières. Si l'on installait de cette manière sur des flammes convenables une série de tubes aptes à rendre tous les sons de la gamme; et si, placé à la distance de 20 à 30 mètres, un musicien chantait la gamme, il appellerait successivement à l'existence chacun des sons des tubes, et la série entière des flammes finirait par chanter.

Lorsqu'on regarde dans un miroir tournant une flamme silencieuse capable d'être excitée comme nous venons de le dire, on n'aperçoit qu'une bande lumineuse continue. On ne peut rien voir de plus beau que la transformation subite de ce ruban continu en un collier de perles très-lumineuses, à l'instant même où la voix entonne la note sensible.

Mettons fin à ces expériences sur les flammes chantantes, en montrant comment on peut amener une première flamme à déterminer l'ignition sonore d'une seconde. Devant vous sont placées deux petites flammes *a* et *b*, séparées par un intervalle d'un mètre, le tube qui recouvre *a* est de 26, celui qui recouvre *b* est de 30 centimètres. Le plus court des deux tubes est muni d'un curseur cylindrique en papier qui permet, en l'allongeant ou le raccourcissant, de modifier le son qu'il rend. La flamme *a* chante actuellement, et la flamme *b*, du tube le plus long, est silencieuse. Je fais monter le curseur de *a*, pour allonger ce tube. La première flamme fait appel à la seconde, qui ne lui répond pas encore. Mais aussitôt que le tube *a* rend le son du tube *b*, qui entoure la seconde flamme, celle-ci chante. On peut répéter l'expérience inverse en faisant de *b* la flamme chantante, et de *a* la flamme silencieuse au départ. En faisant courir le curseur, on atteint un point où la flamme *a* commence à chanter. Une flamme peut ainsi adresser la parole à une autre flamme d'une distance considérable. Quand tout est disposé de manière à rendre les flammes suffisamment sensibles, la note voulue provoque infailliblement la réponse. Ajoutons qu'on peut tout aussi bien réduire au silence une flamme chantante, en ménageant convenablement la voix.

FLAMMES SENSIBLES NUES OU SANS TUBES

Jusqu'ici nous avons mis en jeu des flammes entourées de tubes résonnants ; et aucune d'elles, si on l'avait laissée à nu, n'aurait répondu aux bruits ou aux sons musicaux de nature quelconque par lesquels on aurait essayé de les exciter. On peut faire cependant que des flammes nues deviennent des flammes sympathiques. Dans une précédente leçon (page 101), j'ai dit comment les oscillations de l'eau contenue dans une bouteille pouvaient révéler l'existence de vibrations d'une période déterminée dans toute la multitude des bruits d'un convoi de chemin de fer. Les flammes en queue de poisson qui éclairent les wagons de notre chemin de fer métropolitain ou souterrain sont des réactifs acoustiques bien plus sensibles encore. Si vous y faites attention, vous constaterez que çà et là quelques-unes de ces flammes dansent à l'unisson de certains mouvements vibratoires du convoi. Une flamme, par exemple, qui se termine par une ligne horizontale lorsque le train est au repos, lance périodiquement une langue centrale pendant la marche du train, et danse aussi longtemps que persiste le mode particulier de vibrations qu'elle accuse. Elle s'arrêtera aussitôt que ces vibrations particulières disparaîtront, et dansera de nouveau lorsqu'elles renaîtront. Quand le train est au repos, si l'on tape sur le verre qui abrite la flamme, il est rare qu'elle refuse de sauter, à la seule condition d'être assez sensible.

Cette action du son sur les flammes nues, en forme de queue de poisson, fut remarquée pour la première fois par M. le professeur Leconte dans une soirée musicale aux États-Unis. Voici comment il décrit son observation : « Le concert avait à peine commencé, que je remarquai dans la flamme des bonds *exactement synchrones* avec les battements dont l'oreille me donnait la sensation. Ce phénomène devenait très-frappant pour toutes les personnes présentes, surtout quand les notes énergiques du violoncelle se faisaient entendre. Il était extrêmement curieux de voir avec quelle perfection les *trilles* elles-mêmes de cet instrument se réfléchissaient sur les ailes de la flamme. *Un sourd aurait pu voir l'harmonie.* A mesure que la soirée s'avançait et que *la pression du gaz augmentait* par la diminution de la quantité consommée en ville, le phénomène devenait de plus en plus remarquable. Les *bonds* devenaient graduellement plus énergiques et moins réguliers, et la flamme finissait par ronfler d'une manière continue, rendant le son caractéristique qui indique l'échappement d'une quantité de gaz plus grande que celle qu'on peut brûler d'une manière complète. Je constatai alors, par une expérience directe, que le phénomène *ne* se produisait qu'autant qu'en réglant l'écoulement du gaz, on plaçait la flamme dans la condition où elle doit être pour commencer à *ronfler*. Je reconnus également que les effets observés ne résultaient ni d'une résonnance, ni de l'ébranlement des murs et du plancher de la chambre, causé par des chocs répétés. Il était évident enfin que les pulsations de la flamme *ne pouvaient pas être attribuées* à des vibrations *indirectes* se propageant par l'intermédiaire des murs jusqu'à l'appareil de combustion, mais qu'elles devaient être produites par l'influence *directe* des pulsations sonores de l'air sur le jet de gaz lumineux [1]. »

[1] *Philosophical Magazine*, mars 1858, p. 235.

La remarque significative, que la danse de la flamme commençait seulement lorsqu'elle était sur le point de faire entendre son ronflement, nous révèle le moyen de répéter les expériences du docteur Leconte; en même temps qu'une connaissance plus approfondie des conditions de succès nous permettra de les varier, de les exalter même d'une manière extrêmement frappante. Voici une bougie allumée : nous pourrons, sans l'émouvoir, crier, claquer des mains, faire retentir ce sifflet, battre cette enclume à coups de marteau, ou faire éclater un mélange explosif d'oxygène et d'hydrogène. Quoique dans chacun de ces cas des ondes sonores très-énergiques traversent l'air, la bougie est absolument insensible au son. Il n'y a dans sa flamme aucun mouvement.

Mais, avec ce petit chalumeau, je lance contre la flamme de la bougie un mince courant d'air, qui produise un commencement de frémissement, en même temps qu'il diminue l'éclat de la flamme. Et maintenant, dès que je fais retentir le sifflet, la flamme saute visiblement. L'expérience peut être disposée de telle sorte que le son du sifflet rende à la flamme son éclat primitif, ou fasse disparaître la quantité de lumière qu'elle possède encore.

La flamme du chalumeau de notre laboratoire est tout à fait insensible au son du sifflet, aussi longtemps qu'on ne fait pas intervenir un courant d'air; mais en modérant ou réglant convenablement la force du courant d'air que nous projetons sur elle, nous lui faisons prendre d'abord la forme représentée par la figure 110 *bis*, la force du courant n'étant pas encore suffisante pour rejeter toute la flamme en avant. Dès que nous faisons retentir le sifflet, la portion droite de la flamme s'abaisse, et tant que le son durera elle conservera la forme indiquée figure 111.

Voici une flamme en queue de poisson qui brûle tranquillement et avec éclat, refusant obstinément de répondre à tous les sons musicaux ou non musicaux. Dirigeons contre sa large face le courant d'air du chalumeau; elle est coupée en deux, et le premier coup de sifflet la fait sauter immédiatement. Un

Fig. 110 *bis*.

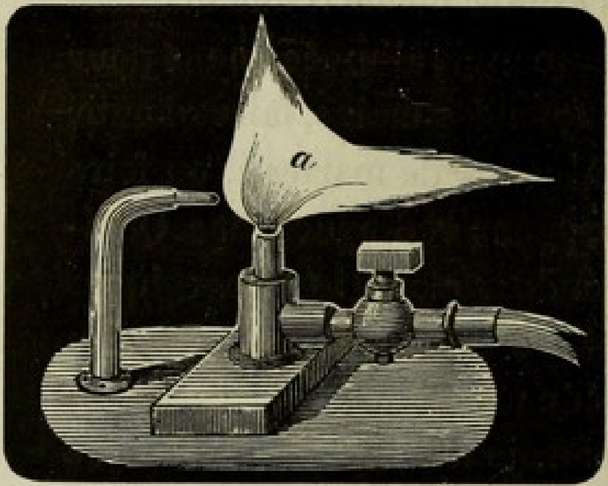
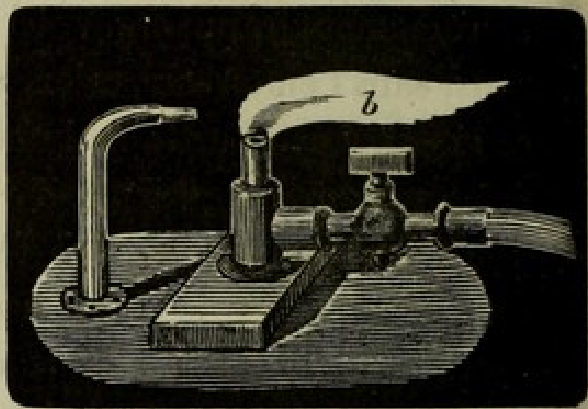


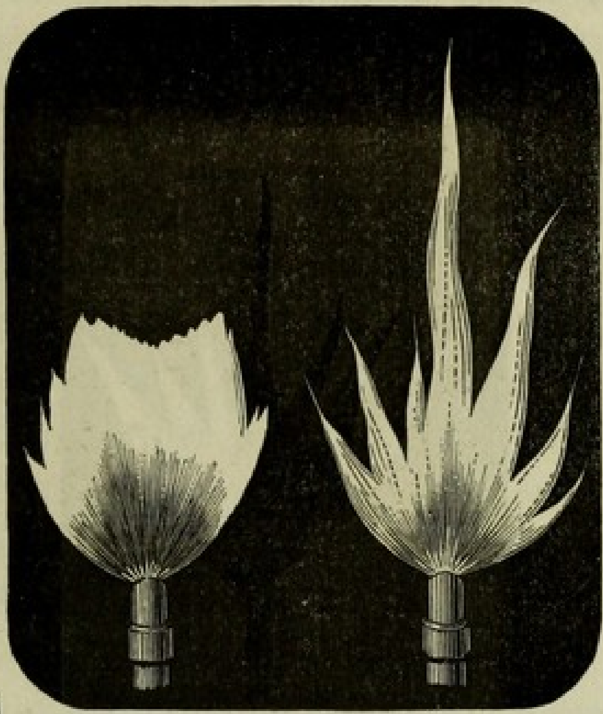
Fig. 111.



coup frappé sur la table détermine les deux moitiés à se réunir, pour un instant, en une flamme unique de la forme ordinaire. Par une légère modification de l'expérience, les deux flammes latérales disparaissent dès que le sifflet retentit, et l'on voit jaillir à leur place une longue langue lumineuse centrale.

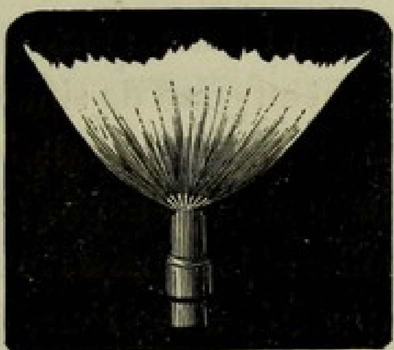
Vous voyez s'étaler maintenant devant vous une autre nappe de flamme, sortant aussi d'un bec ordinaire en queue de poisson (*fig.* 112). Vous pouvez chanter à côté d'elle, faire varier les intonations de votre voix, sans parvenir à exciter en elle le plus petit frissonnement. Recourez, si vous le voulez, à des tuyaux d'orgue, à des diapasons, à des cloches, à des trompettes, vous ne réussirez pas mieux. C'est à peine si vous apercevrez un petit mouvement dans l'intérieur de la flamme, lorsque tout près d'elle retentit ce sifflet si perçant. En ouvrant entièrement le robinet, j'amène la flamme à la limite du ronflement; et dès que le sifflet retentit, vous la voyez prendre un aspect extraordinaire. Elle se partage en sept langues frémissantes (*fig.* 112 *bis*). Aussi longtemps qu'on siffle, les langues restent séparées. Dès que le son cesse, elles disparaissent, la flamme redevient une et tranquille.

Fig. 112. Fig. 112 *bis*.



Si au bec en queue de poisson nous substituons le bec en aile de chauve-souris, nous aurons la flamme large et fixe de la figure 113. Elle est absolument insensible aux sons les plus

Fig. 113.



violents que nous puissions supporter dans cette enceinte.

La flamme est alimentée par ce petit gazomètre, qui met à ma disposition une pression plus grande que celle des conduites de l'établissement. J'agrandis la flamme, et voici qu'elle répond au son du sifflet par un petit frémissement de ses bords. J'augmente la pression jusqu'à ce que la flamme commence à murmurer. Sifflons maintenant, et vous la verrez prendre la forme étrange de la figure 114.

Fig. 114.

Lorsque, à une grande distance, on fait tomber le marteau sur l'enclume, la flamme répond en faisant jaillir ses sept langues.

Une condition essentielle du succès de ces expériences s'est révélée elle-même de la manière suivante : J'étais dans une chambre éclairée par deux flammes en forme de queue de poisson. Une d'elles sautait au coup de sifflet, l'autre restait immobile. Je fermai un peu le robinet de la flamme insensible, donnant par là même un surcroit de pression à la flamme sensible ; elle se mit à ronfler et je l'abaissai en tournant le robinet. Elle devint alors insensible à son tour, quelque près qu'elle pût être de la limite du ronflement. L'orifice trop étroit du robinet à moitié fermé paraissait empêcher l'action du son. Lorsque le robinet fut de nouveau entièrement ouvert, et la flamme abaissée par l'ouverture du robinet du second bec, elle redevint sensible. Jusque-là j'avais essayé un grand nombre de becs, les uns à une seule ouverture, les autres à plusieurs ouvertures séparées ; et, pour beaucoup d'entre eux, l'effet était absolument nul. Éclairé par l'observation que je venais de faire, j'ouvris largement les tuyaux qui alimentaient les flammes, et mes becs les plus réfractaires devinrent ainsi sensibles.

Il nous fut alors facile de mettre pleinement en évidence les faits observés par M. le professeur Leconte. Dans les expériences que nous allons décrire et qui sont bien plus délicates, la précaution que je viens d'indiquer est encore plus essentielle.

M. Barrett, le dernier préparateur de notre laboratoire, observa, le premier, le raccourcissement subi par la longue flamme de ce vieux bec à un seul trou, lorsqu'on faisait retentir les notes plus élevées du plateau circulaire (p. 60) ; et par le choix de becs meilleurs, il réussit à rendre la flamme extrêmement sensible [1]. En prenant bien la précaution signalée ci-dessus, on peut obtenir sans peine, et à un degré très-grand d'exaltation, des effets de raccourcissement des flammes. En voici une de 45 centimètres de longueur, et qui fume abondamment. Dès qu'on siffle, elle se réduit à 22,5 centimètres environ, la fumée disparaît, et l'éclat augmente.

Suivant les circonstances, une longue flamme peut être raccourcie, ou une courte flamme allongée par l'influence des vibrations sonores. Voyez, par exemple, ces deux flammes sortant de becs informes, faits avec des tubes d'étain. Une de ces flammes (*fig.* 115) est longue, droite et fumeuse; l'autre (*fig.* 116) est courte, bifurquée et brillante. On siffle, la longue flamme se raccourcit, se bifurque et devient brillante (*fig.* 117), tandis que la flamme en fourche devient longue et fumeuse (*fig.* 118). On peut donc dire que dans leurs répon-

[1] Pour la description des expériences de M. Barrett, je renvoie le lecteur au *Philosophical Magazine* du mois de mars 1867.

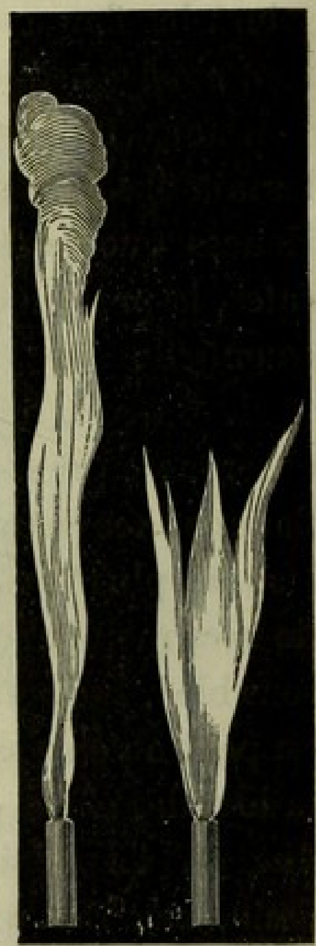
ses au son du sifflet, chacune de ces deux flammes est le complément, en quelque sorte, de l'autre.

La figure 119 représente une autre flamme fumeuse, qui prend, sous l'influence du sifflet, la forme de la figure 120.

Fig. 115. Fig. 116.

Fig. 117 Fig. 118.

Fig. 119.. Fig. 120.



Les expériences précédentes mettent en évidence le raccourcissement et l'allongement des flammes par les vibrations sonores. Ces mêmes vibrations peuvent produire de même leur *rotation*. Voici divers becs faits ici, donnant issue à des flammes plates, longues de 25 et larges de 7 à 8 centimètres dans la partie la plus étalée. Ces becs ont été construits dans le but exprès d'obtenir des flammes trapues et fourchues. Or, dès que le sifflet résonne, la flamme tourne de 90 degrés sur elle-même, et garde sa nouvelle position aussi longtemps que le son continue à se faire entendre.

Devant vous s'étale une flamme admirable par son éclat et sa fixité. Elle sort de l'orifice unique d'un bouton en fer ordinaire. Ce bec qui, pour que sa flamme commence à ronfler, exige une pression considérable, a été choisi dans le but de vous mettre à même de saisir très-distinctement les changements graduels du passage de l'apathie à la sensibilité. La flamme a maintenant 10 centimètres de hauteur, et elle se montre parfaitement indifférente au son. En augmentant la pression, on lui donne une hauteur de 15 centimètres; elle est encore indifférente. Je porte sa hauteur à 20 centimètres, un petit tremblement à peine perceptible répond au son du sifflet. Faisons sa hauteur de 40 centimètres, et la voilà qui saute vivement au moment où le marteau tombe sur l'enclume, ou à l'appel du sifflet. Augmentons encore la pression, la flamme atteint 50 centimètres de hauteur, et ses tremblements intermittents annoncent qu'elle est prête à ronfler. Un léger surcroît de pression détermine, en effet, son ronflement, et réduit sa hauteur à 20 centimètres. Diminuons un peu la pression; la flamme reprend sa longueur de 50 centimètres, et comme précédemment, elle est prête à ronfler et à se raccourcir. Ainsi que les flammes chantantes qui s'élançaient au premier son de la voix, elle se tient sur le bord de l'abîme; la note sensible l'y précipite. Elle se raccourcit au son du sifflet, exactement comme elle le faisait par un excès de pression. Ceci me rappelle l'histoire des muletiers suisses : on dit qu'ils étouffent le son des clochettes de leurs mules en traversant certains passages, de crainte que le tintement ne détermine la chute des avalanches. Pour que cet accident survînt, il faudrait que les neiges fussent dans un état d'équilibre très-instable. Je pense que cela n'est jamais arrivé; mais notre flamme met en évidence la vérité du principe. Nous l'amenons à la limite où la chute devient imminente, et les pulsations sonores achèvent de la faire tomber. Telle est la philosophie très-simple de toutes ces flammes sensibles.

Lorsque la flamme ronfle, le gaz à l'orifice du bec est mis en vibration ; et réciproquement, lorsque le gaz à l'orifice du bec viendra à vibrer, la flamme ronflera, si elle était suffisamment rapprochée de la limite du ronflement. Les vibrations sonores, en agissant sur le gaz dans son passage par l'orifice, deviennent ainsi équivalentes à une augmentation de pression dans le gazomètre. Et voici que se révèle à nous la cause physique du ronflement par excès de pression, phénomène qui, tout commun qu'il soit, reçoit ici pour la première fois, je le crois du moins, une explication satisfaisante. Le gaz subit un frottement au passage de l'orifice, et ce frottement, si la vitesse d'écoulement est assez grande, suffit à imprimer au courant de gaz le mouvement vibratoire qui produit le ronflement. C'est parce que telle est la véritable cause du ronflement, qu'une force presque infiniment petite, agissant sous forme de vibrations de période appropriée, peut produire un effet équivalent à une augmentation considérable de la pression. L'augmentation de pression est, dans le fait, un moyen grossier de produire le ronflement d'une flamme.

Tous les sons n'agissent pas sur la flamme avec la même efficacité. Il faut des ondes de périodes déterminées pour produire le maximum d'effet. Les périodes efficaces sont celles qui sont synchrones des ondes produites par le frottement du gaz lui-même contre les parois de l'orifice du bec. Avec quelques-unes des flammes que vous avez vues, le son d'un sifflet grave était plus efficace que celui d'un sifflet aigu. Avec celle qui est maintenant sous vos yeux, les vibrations actives doivent être très-rapides, et le son par conséquent très-aigu. Voici un diapason qui vibre 256 fois par seconde, rendant un son clair et retentissant. Il n'a aucune action sur cette flamme. En voici trois autres qui vibrent respectivement 320, 384 et 512 fois par seconde. Aucun d'eux ne produit la moindre impression sur la même flamme. Mais en outre de leurs sons fondamentaux, ces diapasons, comme vous le savez, peuvent rendre des sons harmoniques de tons très-élevés. Je leur fais rendre ces sons : ils donnent maintenant 1 600, 2 000, 2 400 et 3 200 vibrations par seconde. La flamme tressaille à chacun des quatre sons, mais le son le plus élevé de la série est celui qui obtient la réponse la plus prompte et la plus énergique.

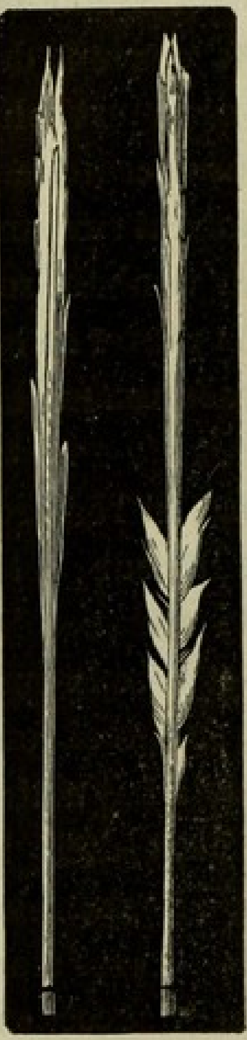
La flamme répond au coup du marteau tombant sur une planche, mais sa réponse au coup du marteau tombant sur une enclume est plus éveillée et plus vive. La raison en est que le son de l'enclume est riche en notes aiguës auxquelles la flamme est particulièrement sensible.

Le son si énergique produit par notre timbre, et renforcé par son tube résonnant, est presque sans effet sur cette flamme. Faisons-le retentir, la flamme reste impassible. Mettons une petite pièce de monnaie en contact avec la surface vibrante ; aussitôt la flamme se raccourcit, frémit et ronfle, parce que le contact de la pièce de monnaie a fait naître des sons plus aigus. Voici un timbre plus petit dont le marteau est mis en action par un mouvement d'horlogerie. Mon préparateur le porte au point de la galerie le plus éloigné de nous et fait partir la détente. Les coups se succèdent par intervalles égaux, à chaque coup la flamme tombe de 50 à 20 centimètres, et ronfle chaque fois en tombant.

La vitesse avec laquelle le son se propage dans l'air est très-bien mise en évidence par ces expériences. Il n'y a pas d'intervalle sensible entre le coup du marteau et l'abaissement subit de la flamme.

Lorsque le son qui agit sur la flamme est de très-courte durée, on observe un effet curieux et instructif. Les côtés de la flamme, vers le milieu de sa longueur et au dessous, apparaissent tout-à-coup bordés de barbes lumineuses, tandis que la flamme centrale garde, en apparence, sa hauteur et sa largeur. La flamme est représentée dans son état normal par la figure 121, et avec ses franges par la figure 122.

Fig. 121. Fig. 122.



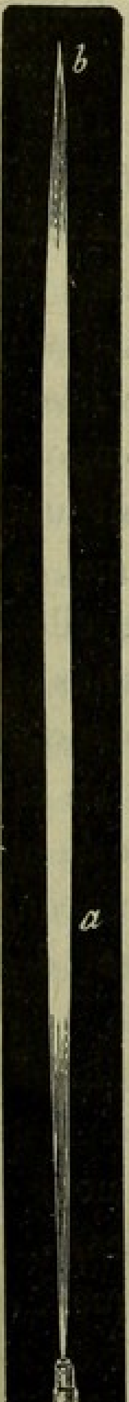
Cet effet est dû à la persistance des impressions sur la rétine. La flamme s'abaisse, en effet, à la hauteur des franges ; mais elle revient si promptement à sa hauteur primitive que pour l'œil elle ne semble en aucune manière raccourcie[1].

La plus merveilleuse des flammes, observées jusqu'ici, est actuellement sous vos yeux. Elle sort de l'orifice unique d'un bec en stéatite, et s'élève à la hauteur de 60 centimètres. Le coup le plus léger, frappé sur une enclume placée à une grande distance, la réduit à 17 centimètres. Les chocs d'un trousseau de clefs l'agitent violemment, et vous entendez ses ronflements énergiques. A la distance de 20 mètres faisons tomber une pièce de cinquante centimes sur quelques gros sous tenus dans la main, ce choc si léger abat la flamme. Je ne puis pas marcher sur le plancher sans l'agiter. Les craquements de mes bottes la mettent en commotion violente. Le chiffonnement ou la déchirure d'un morceau de papier, le frôlement d'une étoffe de soie produisent le même effet. Une goutte de pluie qui tombe la réveille en sursaut. On a placé près d'elle une montre, aucun de vous ne peut en entendre le tic-tac, voyez cependant quel effet il exerce sur la flamme : chaque battement l'écrase ; si on remonte le mouvement, c'est pour la flamme un tumulte effrayant.

[1] On peut modifier ces expériences de mille manières différentes. On peut employer d'autres gaz inflammables que le gaz de la houille. Des mélanges de divers gaz donnent des effets très-frappants et très-beaux ; les plus légères traces d'impureté mécanique influent considérablement sur les résultats.

Le chant d'un moineau perché très-loin suffit à l'abattre; la note du grillon produirait sans doute le même effet. Placé à 30 mètres de distance, j'ai chuchoté et aussitôt la flamme s'est raccourcie en ronflant.

Fig. 123.

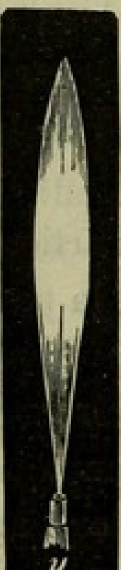


Je déclame ce passage des fureurs d'Oreste de Racine :

> Grâce aux Dieux, mon malheur passe mon espérance.
> Oui, je te loue, ô ciel, de ta persévérance ;
> Appliqué sans relâche au soin de me punir,
> Au comble des douleurs tu m'as fait parvenir....
> Eh bien! filles d'enfer, vos mains sont-elles prêtes?
> Pour qui sont ces serpents qui sifflent sur vos têtes?
> A qui destinez-vous l'appareil qui vous suit?
> Venez-vous m'entraîner dans l'éternelle nuit?
> Venez ; à vos fureurs Oreste s'abandonne.

La flamme fait une sorte de triage des sons émis par la voix ; à quelques-uns elle répond seulement par un signe de tête, à quelques autres par une révérence, à d'autres encore par un salut profond, et il en est beaucoup pour lesquels elle semble ne pas avoir d'oreilles.

Fig. 124.



La figure 123 représente une flamme longue, droite et brillante. En chuchotant près d'elle, ou en agitant un trousseau de clefs à quelques mètres d'elle, on la fait s'abaisser aux dimensions de la figure 124; la partie supérieure *a b* de la flamme s'évanouit subitement. Sa lumière en même temps est presque éteinte, il n'en reste qu'une trace pâle et qui s'aperçoit à peine. Ces figures sont des photographies de la flamme prises sur nature.

Dans les expériences qui nous restent à faire, cette flamme prendra le nom de « *flamme aux* *voyelles* », parce que les diverses voyelles l'affectent différemment. Nous avons appris le mode de formation de ces sons, nous savons qu'ils résultent des combinaisons diverses des sons harmoniques avec le son fondamental. Or, c'est uniquement à ces sons harmoniques que notre flamme se montre sensible et non pas au son fondamental. J'articule d'une voix forte et sonore la diphthongue OU, la flamme ne bouge pas ; je prononce la voyelle O, la flamme tremble ; j'articule É, la flamme est fortement affectée. Je prononce successivement les mots *boot* (BOUTE, botte), *boat* (BOTE, bateau), *beat* (BIT, battement); le premier reste sans réponse; la flamme s'ébranle au second ; mais le troisième produit sur elle une commotion violente. Le son *ah !* est encore beaucoup plus puissant. Si nous ne connaissions pas la composition des sons des voyelles, leur mode d'action serait une énigme indéchiffrable. Telle qu'elle est en elle-même, la flamme est très-apte à révéler la théorie des sons voyelles. Elle est surtout sensible aux sons les plus élevés, et nous en concluons que le son *ah !* contient des notes plus aiguës que celles du son É ; que parmi les composantes de É il en est de plus aiguës que celles de O, qu'il en est de même de OU par rapport à O, etc. Je n'ai pas besoin d'ajouter que ces conclusions sont parfaitement d'accord avec l'analyse des voyelles par M. Helmholtz.

Cette flamme est particulièrement sensible à l'articulation de la consonne sifflante *s*. Que dans cet auditoire la personne la plus éloignée me fasse le plaisir de siffler, ou de prononcer *Hiss*, ou répéter le vers *Pour qui sont ces serpents...*, la flamme lui fera sur-le-champ un accueil sympathique. Le sifflement comprend les éléments les plus aptes à agir énergiquement sur elle. Le gaz sort du bec avec une sorte de sifflement, et voilà pourquoi tout son étranger ayant le même caractère devient excessivement efficace. Voici une boîte en métal renfermant de l'air comprimé. J'ouvre un instant le robinet, et je laisse échapper une bouffée d'air; la flamme s'abaisse sur-le-champ, mais non par un courant d'air allant de la boîte à la flamme, la distance rend ce mode d'action complétement impossible : mais c'est que le bruit de l'air sortant de la boîte contient le son qui affecte la flamme. Placé dans la galerie, le préparateur ouvrira périodiquement la boîte, et en laissera sortir des bouffées d'air ; à chaque bouffée la flamme s'abaissera. Il est donc vrai que la sortie de l'air du second orifice rend tumultueuse la flamme du gaz issu du premier. Je pose enfin sur la table cette boîte de musique, et je lui fais jouer son air. La flamme se comporte comme un être sensible, faisant un léger salut à certains sons, et accueillant les autres avec une courtoisie profonde.

Je m'étais proposé, à une certaine époque, de n'aborder la question des flammes sensibles qu'après une série d'expériences qui vous auraient paru très-frappantes, si vous n'aviez pas été témoins des phénomènes que j'ai fait passer sous vos yeux. Ce n'est pas à la flamme, en tant que flamme, que nous devons ces effets extraordinaires. On en obtient de substantiellement identiques, quand on fait passer par de petits orifices, sous une pression convenable, des jets de gaz non enflammés, d'acide carbonique, d'hydrogène, ou même d'air. Toutefois, comme aucun de ces gaz n'est visible par lui-même, à sa sortie de l'orifice, il est nécessaire de leur associer une substance visible qui, en partageant leurs mouvements, les révèle à nos yeux. La méthode employée de temps en temps dans cet amphithéâtre pour rendre visibles des tourbillons de l'air vous est parfaitement connue. Par de petits coups frappés sur une membrane qui ferme la large ouverture d'un entonnoir rempli de fumée, nous obtenons de belles couronnes de fumée qui dessinent les mouvements de l'air. En associant de la fumée à nos jets de gaz, dans nos expériences actuelles, nous pourrons les suivre des yeux dans leurs trajets, et constater que ces gaz non enflammés se montrent aussi sensibles que les flammes. Les jets de fumée dansent, se bifurquent, se raccourcissent, s'allongent en colonnes, dès que la note qui leur convient se fait entendre. Nous allons faire dans cette voie quelques expériences intéressantes. Au-dessous d'un gazomètre, nous installons deux soucoupes contenant, l'une de l'acide chlorhydrique, l'autre de l'ammoniaque. Il se forme en abondance des fumées de sel ammoniacal qui se mêlent au gaz du réservoir. Nous pouvons opérer ainsi sur du gaz d'éclairage, de l'acide carbonique, de l'air ou de l'hydrogène. Chacun de ces gaz donne de bons résultats. Mais notre excellent bec de stéatite conserve ici la supériorité qu'il manifestait avec les flammes. J'en fais sortir une mince colonne de fumée. Je fais sonner le sifflet, si efficace, quand il s'agissait des flammes : il se montre tout à fait impuissant. Je mets en jeu, sans plus de succès, les notes les plus élevées d'une série de tuyaux de pan. Les notes plus basses ne seront pas plus efficaces. Mais au son rendu par un certain tuyau qui occupe le milieu de la série, la colonne de fumée s'abat tout-à-coup, prenant la forme d'une tige courte, surmontée d'une tête touffue. Elle est aussi abattue comme par un courant d'air vertical, quand on frappe sur la table. Elle tombe à chaque coup. Le bruit du marteau frappé sur une enclume est au contraire presque sans effet. Les notes efficaces sont ici beaucoup moins élevées que dans le cas des flammes.

Le rétrécissement que subissent ces colonnes de fumée est plus considérable, relativement à leur longueur, que lorsqu'il s'agissait des flammes ; un choc léger sur la table suffit pour amener à l'état de bouquet touffu surmontant une tige de 2 à 3 centimètres un jet de fumée haut de 45 centimètres. La colonne de fumée répond en outre à la voix. La toux l'abat sur-le-champ, et le son de la boîte de musique la fait danser. Quelques notes n'ont d'autre effet que d'arrondir en bouquet le sommet de la colonne de fumée. Sous l'action d'autres notes le bouquet se forme vers la moitié de la tige; sous l'action de quelques autres notes enfin, de ton mieux choisi et plus sympathique, le bouquet ou *cumulus* se forme à 2 ou 3 centimètres au-dessus de l'orifice. Si les sons musicaux continuent à se faire entendre, le mouvement de la colonne de fumée consiste en sauts ou passages brusques d'une de ces formes à l'autre. Les figures 125 et 125 *bis* représentent quelques-unes de ces formes curieuses.

Fig. 125.

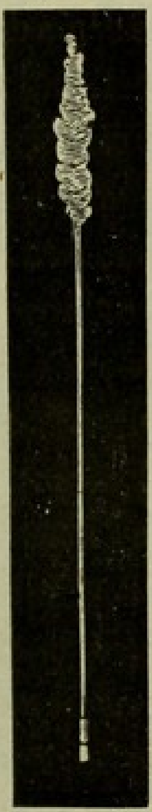
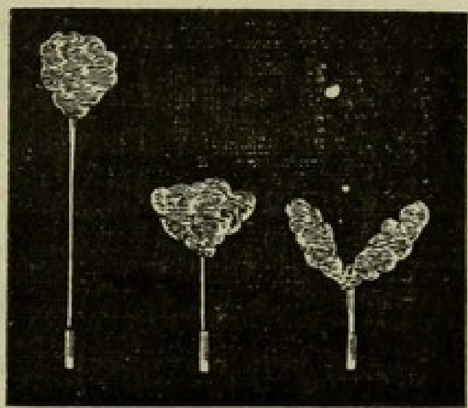


Fig. 125 *bis*.

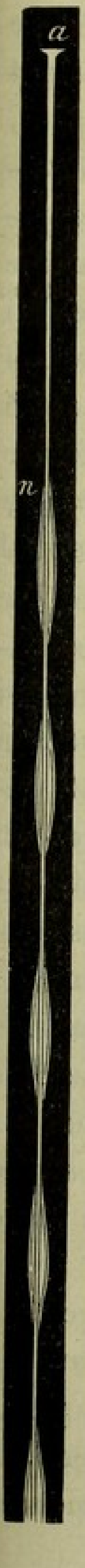


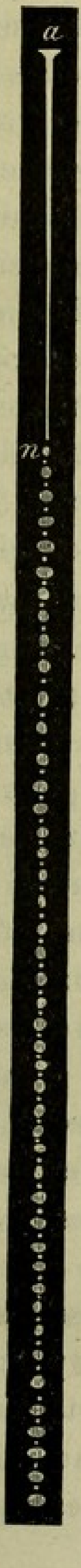
Dans une atmosphère parfaitement tranquille, ces minces colonnes de fumée peuvent s'élever à une hauteur d'environ 60 centimètres, se fondant dans l'air à leur sommet. Quand il en est ainsi, leur impressionnabilité dépasse de beaucoup en délicatesse celle des flammes même les plus sensibles, et quoique moins frappants dans leur aspect que les flammes, les jets de fumée sont souvent plus gracieux. Si je répétais les vers de Racine en présence d'un jet de fumée sensible, ce ne seraient plus seulement certains mots, mais chaque mot, chaque syllabe qui troubleraient sa marche et le jetteraient dans la confusion. Mais pour que ces effets merveilleux se produisent, il faut une atmosphère parfaitement tranquille. Les expériences sur les flammes, au contraire, réussissent dans une atmosphère où les jets de fumée seraient absolument ingouvernables[1].

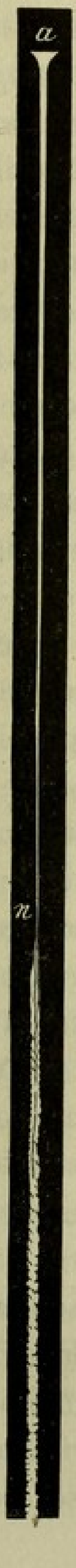
Nous n'avons considéré dans ce qui précède que des jets de gaz d'éclairage enflammé ou non enflammé, d'acide carbonique, d'hydrogène et d'air ; étudions maintenant les jets d'eau. On connaît depuis longtemps une série de belles expériences qui ont une étroite parenté avec celles qui viennent d'être décrites. Ce sont les expériences de Félix Savart sur les veines liquides, que nous avons répétées, vérifiées et modifiées de diverses manières dans cet amphithéâtre. Si le fond d'un vase rempli d'eau est percé d'un orifice circulaire, la veine liquide qui en sort se compose de deux portions bien distinctes et qui ne sauraient être confondues. La portion de la veine la plus rapprochée de l'orifice est fixe et limpide, présentant presque l'apparence d'un bâton de verre. Elle diminue de diamètre à mesure qu'elle descend, atteint un point de contraction maximum, à partir duquel elle apparaît agitée et trouble. La course de la veine est en outre marquée par des renflements et des contractions périodiques. Savart a représenté la veine telle qu'il la voyait dans la figure 126. *a* est l'orifice ou la naissance de la veine, la partie *an* est limpide et fixe, tandis que tout ce qui s'étend au-dessous est dans un état d'agitation tumultueuse. Cette portion inférieure de la veine a pour les yeux une

[1] Si l'on pouvait voir des jets de gaz non enflammés, et sans mélange de fumée, je ne doute pas qu'on ne trouvât leur sensibilité plus grande encore.

Fig.126. Fig. 127. Fig. 128.







certaine apparence de continuité. Cependant, lorsqu'on passe rapidement le doigt à travers la veine, il arrive quelquefois qu'il n'est pas mouillé ; il n'en serait pas ainsi, évidemment, si elle était réellement continue.

En outre, la portion supérieure de la veine intercepte la vision, ce que ne fait pas la partie inférieure, même quand le liquide est du mercure. En réalité la veine, à partir du point *n*, se résout en sphérules liquides, et sa continuité apparente est l'effet de la persistance des impressions produites sur la rétine par les gouttes d'eau qui tombent. Pourvu que les gouttes se succèdent l'une à l'autre à des intervalles d'un dixième ou de moins d'un dixième de seconde, l'impression produite par une goutte d'eau est renouvelée, avant d'avoir cessé, par la goutte qui la suit, et il devient impossible d'observer aucune solution de continuité. Si, pendant qu'on regarde la partie trouble de la veine, on baisse subitement la tête, cette portion de la colonne descendante se montre un instant sous sa forme réelle de gouttes séparées. Le moyen le plus simple de résoudre la veine dans ses globules constituants est peut-être celui que j'ai adopté depuis longtemps : l'éclairage de la veine au sein d'une chambre obscure, par une succession d'étincelles ou d'éclairs électriques. Chaque éclair lumineux fait voir les gouttes d'eau comme si elles étaient immobiles dans l'air.

Si on pouvait rendre permanent l'aspect de la veine illuminée par un seul éclair de lumière électrique, elle serait représentée par la figure 127. Et cette figure nous révèle en même temps la cause des renflements et des contractions que l'on observe dans la portion trouble de la veine. Les gouttes en tombant changent continuellement de forme. A l'instant où elle se détache de la portion limpide, la goutte a la forme d'un sphéroïde allongé dans la direction verticale. Mais un liquide ne peut conserver cette forme elliptique lorsqu'il est abandonné aux attractions de ses propres molécules. Le sphéroïde allongé tend à devenir une sphère. Par conséquent, son plus long diamètre se raccourcit; mais, ainsi qu'un pendule qui tend à revenir à sa position de repos, la contraction du diamètre vertical va trop loin, et la goutte devient un sphéroïde allongé dans le sens horizontal, aplati dans le sens vertical. Or, les contractions du jet ont lieu au point où la goutte est allongée verticalement, et les renflements aux points où elle est allongée horizontalement. On remarque encore que deux grandes gouttes consécutives sont séparées par une troisième plus petite. Chaque fois qu'une grande goutte se détache par une sorte de coup ou d'impulsion de la part de la veine en retraite, elle est suivie d'un petit satellite. Savart veut que ces formes de la veine soient absolument invariables.

Cette propriété des veines liquides de se diviser en gouttes a suscité de nombreuses discussions. Ont-elles pour cause le frottement contre les bords de l'orifice ? Savart faisait partir les pulsations de l'orifice sans les attribuer au frottement. M. Plateau rattache ces apparences à ses belles expériences sur les cylindres liquides. Quelle que soit leur cause, les pulsations existent, et elles sont fortement influencées par les vibrations sonores, qui rendent la portion limpide de la veine plus courte qu'elle ne le serait autrement. Au centre d'une grande cité, il est difficile d'obtenir la tranquillité d'atmosphère nécessaire au plein développement de la portion continue de la veine. Cependant, Savart était si habile à soustraire sa veine à l'influence de ces variations irrégulières, que la partie limpide s'allongeait autant que le représente la figure 128. La figure 126, il faut se le rappeler, représente la veine exposée aux vibrations irrégulières de la ville de Paris, tandis que la figure 128 représente une veine produite dans les mêmes conditions, mais soustraite aux vibrations de l'air et du sol de la capitale.

Les gouttes dans lesquelles la veine finit par se résoudre commencent à se former même dans la portion limpide, où elles annoncent leur présence sous forme de protubérances annulaires qui deviennent de plus en plus prononcées, et qui finissent par se détacher. Leur lieu d'origine est l'orifice lui-même, et, même sous des pressions modérées, elles se succèdent les unes aux autres assez rapidement pour produire un faible son musical. On peut déterminer le ton de cette note en recevant les gouttes sur une membrane ; et voici que nous arrivons au trait d'union entre les phénomènes des veines liquides et ceux des flammes sensibles ou des jets de fumée. Si une note est émise à l'unisson de celle de la veine, la portion limpide se raccourcit immédiatement. Le ton du son peut varier dans une certaine étendue sans cesser de produire le raccourcissement, mais la note à l'unisson est la plus efficace de toutes. Les expériences de Savart sur les veines tombant verticalement, répétées dans le laboratoire de l'Institution royale, ont donné des résultats extrêmement remarquables. A la distance de 30 mètres, la portion limpide d'une veine tombant verticalement a été subitement raccourcie par le retentissement d'un tuyau d'orgue qui rendait un son d'intensité moyenne, mais de ton convenable, ni trop, ni trop peu élevé.

L'excellent expérimentateur français a fait aussi jaillir des veines dirigées horizontalement ou dans des directions obliques à l'horizon, et il a trouvé que dans certains cas les vibrations sonores avaient le pouvoir de diviser le jet en deux ou trois branches. Dans ces expériences, l'écoulement se faisait par un orifice en mince paroi, que nous remplacerons par notre appareil de prédilection, le bec en stéatite, qui avec l'eau garde la supériorité qu'il manifestait déjà avec les flammes et les jets de fumée. Il aura, en outre, l'avantage de nous révéler quelques effets entièrement nouveaux. Nous le relions par un tube en caoutchouc avec les conduites

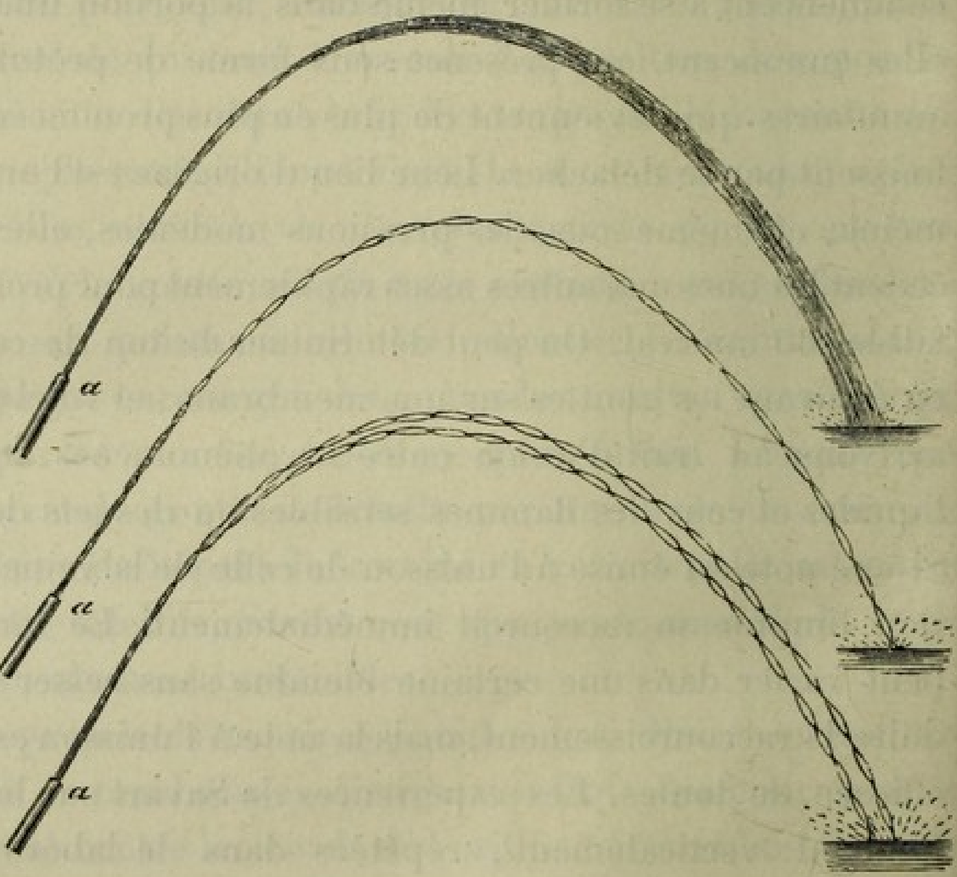


Fig. 129.
Fig. 130.
Fig. 131.

d'eau de cet établissement, puis en le pointant obliquement nous lui faisons produire un beau jet parabolique (*fig.* 129).

A une certaine distance de l'orifice, la veine se résout en jolies sphérules, dont les mouvements ne sont pas assez rapides pour donner à la veine une apparence de continuité. Au sommet de la parabole, ce collier de perles a plus de trois centimètres de largeur, et plus loin les gouttes d'eau sont encore plus éparpillées. Un seul coup d'archet sur un diapason qui exécute 512 vibrations dans une seconde suffit pour rapprocher instantanément les gouttes éparses, comme si elles obéissaient à leurs attractions mutuelles, et leur donner l'apparence d'un arc liquide continu, dont la hauteur et l'amplitude peuvent être de 1 à 2 mètres (*fig.* 130). Aussi longtemps que résonne la note efficace, la veine ressemble à un filet d'eau solidifiée, tant son mouvement est devenu insensible. J'éteins les vibrations du diapason, l'arc cesse d'être continu, et nous voyons se reproduire le jeu des perles liquides que nous avons admiré tout d'abord. Chaque coup d'archet opère une nouvelle réunion des gouttes, et les fait couler suivant une même ligne commune à toutes.

Un flageolet ou un tuyau d'orgue qui rend la note du diapason exerce aussi sur la veine une action énergique. Ma voix n'a pas moins de puissance. J'émets une note sans lui donner une très-grande force, et à son commandement les gouttes éparses se réunissent. D'une distance de 20 mètres, ma voix semble n'avoir rien perdu de son efficacité; elle courbe le jet liquide, et force les gouttes à se rapprocher comme si j'étais placé tout près de la veine.

Les effets des battements eux-mêmes sur la veine sont aussi curieux qu'instructifs. Ils peuvent être produits par des tuyaux d'orgue ou des diapasons. Voici deux diapasons dont l'un donne 512 et l'autre 508 vibrations par seconde. Vous apprendrez, dans notre prochaine leçon, que lorsque ces deux diapasons résonnent en même temps, on doit avoir quatre battements par seconde. Je les fais vibrer à la fois, et je constate que la veine liquide rassemble ses gouttes ou les disperse synchroniquement avec les battements. Placé près de la veine, je conclus du mouvement des éclats de la lumière qu'elle réfléchit à l'existence d'oscillations rhythmées de même période que les battements. La retraite et l'avance des gouttes relativement au point où elles se forment d'abord, suivent la même période et produisent un très-bel effet. Dans ces conditions, la sensibilité de la veine est vraiment étonnante, elle rivalise avec celle de l'oreille. Plaçons les deux diapasons sur une table éloignée, et laissons leurs battements s'éteindre graduellement, le mouvement rhythmé de la veine continue aussi longtemps que le son peut s'entendre. Une veine encore plus sensible se montrerait certainement supérieure à l'oreille, résultat bien surprenant, si l'on considère la merveilleuse délicatesse de l'organe de l'ouïe[1].

En introduisant une bouteille de Leyde dans le circuit d'un puissant appareil d'induction, on obtient, comme le savent les personnes initiées aux phénomènes électriques, une série d'étincelles, denses et éblouissantes, qui ne brillent qu'un instant. Rendons la salle obscure et éclairons la veine par une semblable série d'étincelles. Les gouttes sont rendues distinctes, chacune d'elles est transformée en une petite étoile extrêmement brillante. Elles sont, en outre, très-largement espacées. Je fais appel au jet liquide en émettant la note convenable ou efficace. Les gouttes éparses se rassemblent aussitôt, pour former un collier de perles d'une inimitable beauté. Je suspends ma voix, et le collier est de nouveau mis en pièces ; je fais un nouvel appel et les étoiles dispersées se distribuent de nouveau le long d'une courbe

[1] Lorsque ces deux diapasons étaient mis *en contact* avec le vase d'où sortait la veine liquide, l'action mouvementée de la veine se continuait visiblement longtemps après qu'on avait cessé de les entendre.

sensiblement continue. Tout étant ainsi arrangé, j'agite doucement le tube de caoutchouc qui alimente le jet et j'obtiens des files entrelacées de perles lumineuses.

Dans ces expériences, la veine entière se rassemble en un seul arc, sous l'action de la note efficace; mais on peut les varier de manière à obtenir une division de l'arc en deux ou plusieurs branches, comme le montre la figure 131. Cette fois encore, les dessins sont impuissants à rendre les effets observés, car les apparences les plus curieuses dépendent des passages soudains de la veine d'un état à l'autre. La surprise résulte surtout du mouvement que le dessin est impuissant à rendre [1].

RÉSUMÉ DE LA LEÇON VI.

Lorsqu'une flamme de gaz d'éclairage est placée dans un tube, le courant d'air qui passe sur la flamme est mis en vibration, et il en résulte des sons musicaux.

En tenant compte de la haute température de la colonne d'air associée à la flamme, le ton du son rendu est celui d'un tuyau d'orgue ouvert, de la longueur du tube qui entoure la flamme.

Les vibrations de la flamme, pendant l'émission du son, consistent en une série d'extinctions périodiques, totales ou partielles, dans les intervalles desquelles la flamme recouvre une partie de son éclat.

La périodicité du phénomène peut se démontrer au moyen d'un miroir concave qui projette sur un écran l'image de la flamme vibrante. Lorsque l'image est nettement limitée, la rotation du miroir décompose l'image simple de la flamme en une série d'images séparées. Les espaces obscurs compris entre les

[1] Les expériences sur les flammes chantantes ont été considérablement étendues par mon préparateur. En faisant frotter deux flammes l'une contre l'autre, il a obtenu divers sons musicaux, dont quelques-uns rappellent le son de la trompette, d'autres le chant de l'allouette. Le frottement de deux becs de gaz non allumés produit des effets tout semblables, mais moins intenses. Lorsqu' on fait tomber sur une lame de platine les deux flammes d'un brûleur en queue de poisson, comme dans le *perfector* de Scholl, les sons ont le timbre de la trompette et sont très-retentissants.

images séparées correspondent aux extinctions de la flamme, tandis que les images elles-mêmes correspondent aux rétablissements périodiques de sa lumière.

Indépendamment de la note fondamentale du tube qui lui est associé, la flamme, dans des conditions convenables, peut exciter les sons harmoniques de ce tube. Les divisions successives de la colonne d'air correspondantes aux sons harmoniques sont les mêmes que dans un tuyau d'orgue ouvert.

Lorsqu'un tube contient une flamme silencieuse, l'émission d'une note presque à l'unisson du tube fait sauter la flamme, et la fait en outre chanter, si la flamme occupe une position convenable dans le tube.

Pendant qu'une flamme chante, une note presque à l'unisson de la sienne produit des battements ; et la flamme saute synchroniquement aux battements. La danse de la flamme s'observe encore lorsqu'elle n'a pas dans le tube la position convenable pour qu'elle chante.

FLAMMES NUES.

Lorsqu'on augmente la pression du gaz qui alimente une flamme nue ou sans tube, les dimensions de la flamme augmentent dans une certaine mesure. Mais si la pression dépasse une certaine limite, la flamme gronde ou ronfle.

Le grondement ou ronflement de la flamme a pour cause l'état de vibration imprimé au gaz par l'orifice du bec, lorsqu'il supporte une trop grande pression dans son passage à travers cet orifice.

Lorsque aux vibrations communiquées par l'orifice s'ajoute l'influence d'un son extérieur, la flamme ronfle sous une pression moindre que celle qui était nécessaire pour produire cet effet.

Le gaz soumis à une pression excessive est mis en vibrations d'une période déterminée dans son passage à travers le brûleur. Pour produire sur la flamme le maximum d'effet, il faut faire entendre un son extérieur dont les vibrations soient synchrones de celles du gaz sortant de l'orifice.

Quand cette condition est remplie, et que la flamme est sur le point de ronfler, elle devient un réactif acoustique d'une incomparable délicatesse.

A une distance de 30 mètres, par exemple, le chant d'un moineau suffit pour émouvoir fortement la flamme.

Ce n'est pas à la flamme en tant que flamme qu'on doit attribuer ces effets. On en obtient de semblables essentiellement, quand, au lieu de flammes, on opère sur des jets de gaz d'éclairage non enflammés, ou sur des jets d'acide carbonique, d'hydrogène et d'air dans leur état naturel. Ces jets peuvent être rendus visibles par leur mélange avec de la fumée ; et les jets de fumée se montrent sensibles, plus sensibles même que les flammes aux vibrations sonores.

Quand une chambre obscure n'est éclairée que par une flamme sensible très-brillante, si l'on y fait sonner une cloche satisfaisant à certaines conditions, le son produit une série périodique d'extinctions de la flamme. Chaque coup de cloche donne lieu à un obscurcissement momentané de la chambre.

Les expériences de Savart relatives à l'influence des vibrations sonores sur les jets d'eau appartiennent à la même classe de phénomènes. Ce sujet est traité sommairement, et cependant d'une manière assez complète, dans la leçon suivante.

LEÇON VII.

Lois des mouvements vibratoires dans l'eau et dans l'air. — Superposition des vibrations. — Interférence et coïncidence des vibrations sonores. — Destruction du son par le son. — Action combinée de deux sons presque à l'unisson. — Théorie des battements. — Démonstration optique du principe des interférences. — Augmentation de l'intensité du son par extinction partielle des vibrations. — Tons résultants. — Conditions de leur production. — Démonstrations expérimentales. — Tons par différence et tons par sommation. — Théorie de Young et de Helmholtz.

Il m'est souvent arrivé dans le port de Cowes, par un temps calme, de contempler de mon bateau les images des navires avec leurs mâts et leurs cordages réfléchies par le miroir de l'eau. Ces images me révélaient la condition de la surface liquide, indiquant par de longues et larges protubérances le passage des grosses lames, par de petites dentelures les rides qui rampent comme des parasites sur les flancs des nobles vagues. La mer est toujours prête à s'accommoder aux exigences de toutes ces ondulations grandes ou petites. Lorsque je touchais la surface avec ma rame, ou même quand je laissais tomber de ma rame quelques gouttes dans l'eau, il y avait aussi place à sa surface pour les très-petites vagues que j'engendrais ainsi. Ces découpures de la surface par les vagues et les rides n'ont de limites que celles de nos moyens d'observation ; chaque vague, chaque ride demande la place à laquelle elle a droit, et retient son existence individuelle parmi la multitude des mouvements qui agitent l'eau en tout sens.

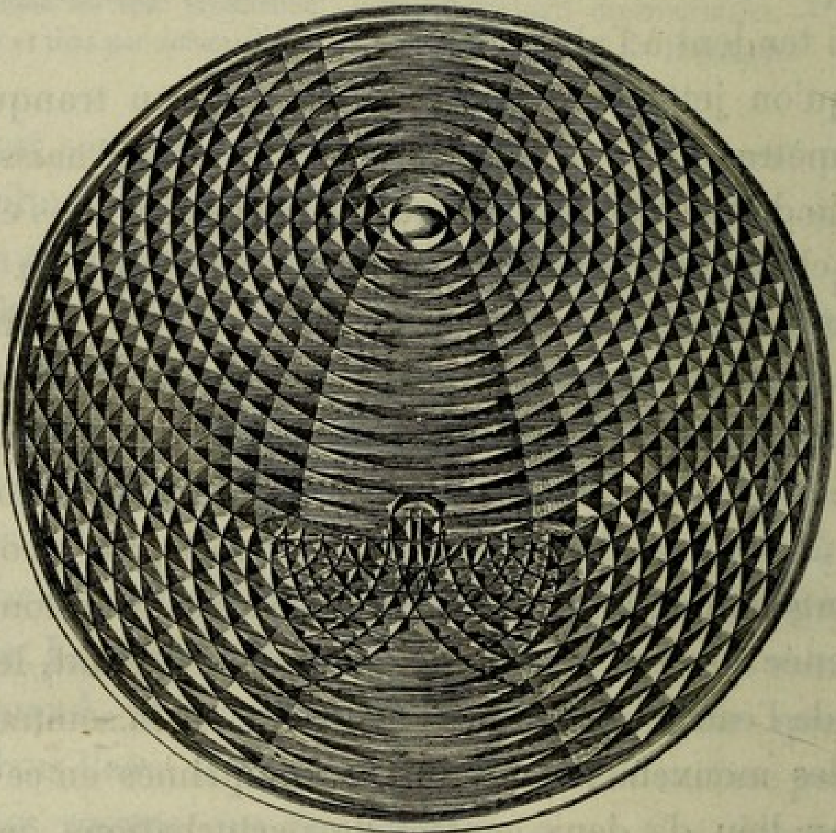
La loi qui régit ce chassé-croisé de la mer, ce pêle-mêle des innombrables petites vagues, est *que le mouvement résultant de chaque molécule d'eau est la somme des mouve-*

ments individuels dont elle était animée. Lorsqu'une particule est sollicitée au même instant par deux impulsions tendant toutes deux à la soulever, elle est soulevée par une force égale à la somme de ces deux impulsions. Lorsqu'elle est sollicitée par deux impulsions dont une tend à l'élever et l'autre à l'abaisser, elle obéit à une force égale à la différence des deux impulsions. Quand, par conséquent, nous parlerons de la somme des mouvements, nous entendrons la *somme algébrique*, en considérant comme positifs les mouvements qui tendent à élever la molécule, et comme négatifs ceux qui tendent à l'abaisser.

Lorsqu'on jette deux pierres dans une eau tranquille, à 6 ou 8 mètres l'une de l'autre, chacune donne naissance à une série d'ondes circulaires qui se propagent en s'élargissant, et chaque onde est formée d'une crête et d'un sillon. Les deux systèmes d'ondes arrivent à se toucher d'abord, à se croiser ensuite en produisant à la surface des éminences et des dépressions. Là où une crête coïncide avec une crête, l'eau s'élève à une hauteur double ; là où un sillon coïncide avec un sillon, la dépression est deux fois plus profonde. Aux points enfin où une crête coïncide avec un sillon, l'eau est ramenée à son niveau moyen. En chaque point, le mouvement de l'eau, comme nous l'avons dit, est la somme algébrique des mouvements qui lui sont imprimés en ce point. Et si, au lieu de deux centres de perturbations, nous en concevons dix, cent, ou mille, la conséquence sera la même. Le fait physique réel peut dépasser notre puissance d'observation, mais la loi générale énoncée plus haut se maintiendra toujours.

Au lieu des intersections d'ondes parties de deux centres différents, nous pouvons amener à se croiser deux ondes, l'une directe, l'autre réfléchie, originaires d'un même centre. Plusieurs d'entre vous ont admiré les beaux effets qu'on obtient en projetant sur un écran la lumière réfléchie par les ondes ou rides de l'eau, contenue dans une auge ordinaire. L'effet est beaucoup plus brillant, quand on remplace l'eau par le mercure. On peut faire alors, par un mode convenable d'agitation, que des ondes directes et réfléchies se croisent, s'entrelacent, se roulent et se déroulent, se nouent et se dénouent, faisant ainsi les unes les autres la plus merveilleuse analyse de leurs mouvements.

Fig. 132.



La figure 132, copiée de l'ouvrage des frères Wéber, donnera quelque idée de la beauté des effets ainsi obtenus ; elle représente le chassé-croisé d'ondes directes et réfléchies à la surface de l'eau dans un vase circulaire, le centre de perturbation est indiqué par le plus petit cercle éclairé de la figure, situé à égale distance de la circonférence et du centre du vase.

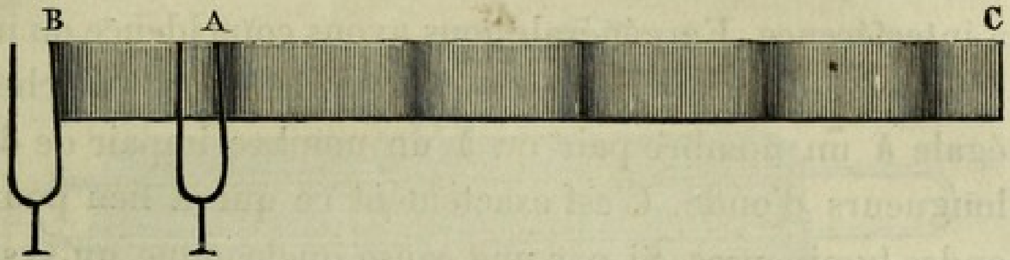
L'air partage avec l'eau cette propriété de recevoir et de transmettre des multitudes d'impulsions, qui assure à toutes les ondes sonores, quelque nombreuses qu'elles soient, leur droit à l'espace et au mouvement. Une même masse d'air est apte à recevoir dans son sein et à propager à la fois les vibrations de mille instruments de musique. Quand nous essayons de nous représenter les mouvements de l'air, de rendre présent à l'œil de l'esprit cette lutte acharnée des impulsions directes et répercutées, l'imagination se replie sur elle-même effrayée de son audace. Néanmoins au milieu de cette complexité désespérante, la loi énoncée tient bon; chaque molécule d'air est animée d'un mouvement résultant égal à la somme algébrique des impulsions qu'elle a reçues. Et le plus étonnant de tout cela, c'est que l'oreille humaine, quoiqu'elle ne reçoive l'action que d'un cylindre d'air du diamètre d'un tuyau de plume, puisse découvrir les composantes de ce mouvement, et par un acte d'attention suffisante, arriver à isoler chacun des sons particuliers de cet imbroglio aérien.

Passons l'archet sur un diapason, que nous nommerons A pour le distinguer, et amenons-le à envoyer à travers l'air une série d'ondes sonores. Plaçons un second diapason B derrière le premier, et faisons-le vibrer simultanément. Les ondes partant de B traversent l'air déjà traversé par les ondes émanées de A. Il est facile de concevoir que les diapasons peuvent vibrer de telle manière que les condensations de l'un coïncident avec les condensations de l'autre, et les raréfactions du premier avec les raréfactions du second. S'il en est ainsi, les deux diapasons s'assisteront l'un l'autre. Les condensations deviendront plus condensées, les raréfactions plus raréfiées, et puisque l'intensité du son ne dépend que de la différence de densité entre les condensations et les raréfactions, les deux diapasons vibrants, s'aidant ainsi l'un l'autre, produiront un son plus intense que celui de l'un ou de l'autre vibrant seul.

Mais il est aussi facile de supposer que les deux diapasons soient l'un par rapport à l'autre dans des conditions telles que l'un exige une condensation là où l'autre exigerait une raréfaction ; que l'un des diapasons, par exemple, pousse en avant les particules d'air que l'autre tend à ramener en arrière. Si ces deux tendances opposées sont égales, les particules ainsi sollicitées ne se mouvront ni en avant ni en arrière, et il en résultera le repos aérien qui correspond au silence. Il se pourrait ainsi qu'en ajoutant au son d'un diapason le son d'un autre diapason, on fît évanouir les sons de tous les deux. Nous voici en présence d'un phénomène qui, plus que tout autre, est caractéristique du mouvement ondulatoire. Ce fut ce phénomène rendu manifeste dans l'optique qui conduisit à la théorie ondulatoire de la lumière ; la preuve la plus irréfragable de la vérité de cette théorie consiste dans le fait que de la lumière ajoutée à de la lumière peut produire l'obscurité, de même que nous pourrons produire le silence en ajoutant du son à du son.

Pendant la vibration d'un diapason, la distance qui sépare ses deux branches est alternativement augmentée et diminuée. Appelons impulsion *extérieure* le mouvement qui augmente la distance, et impulsion *intérieure* le mouvement qui la diminue. Supposons maintenant que nos deux diapasons A et B atteignent aux mêmes instants les limites de leurs pulsations extérieures et de leurs pulsations intérieures. Dans ce cas, les *phases* de leur mouvement, c'est l'expression technique reçue, sont les mêmes. Pour plus de simplicité, nous nous bornons à considérer les branches de droite des deux diapasons A et B (*fig.* 133), en faisant abstraction des branches de gauche ; et nous nous demandons quelle doit être la distance entre les deux branches A et B, lorsque les deux condensations et leurs deux raréfactions, indiquées respectivement dans la figure par les ombres et

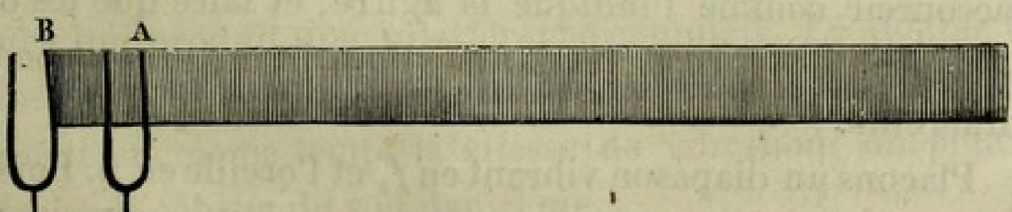
Fig. 133.



par les clairs du dessin, sont en pleine coïncidence. Un instant de réflexion nous fera comprendre que la coïncidence devra avoir lieu si la distance entre B et A est égale à la longueur totale d'une onde sonore. La coïncidence aura lieu encore si la distance entre A et B est égale à deux, à trois, à quatre, etc., en un mot à un nombre quelconque de longueurs d'onde. Dans tous ces cas il y aura coïncidence des deux systèmes d'ondes, et par conséquent renforcement du son de chaque diapason par le son de l'autre. Les condensations et les raréfactions entre A et C seront toutes deux plus fortes qu'elles ne le seraient si l'on supprimait un des diapasons.

Mais si la branche B est seulement à une demi-longueur d'onde de A, qu'arrivera-t-il? Evidemment les condensations de l'un des systèmes d'onde coïncideront avec les raréfactions de l'autre système; et nous aurons *interférence*; l'air à droite de A sera réduit au repos. C'est ce que montre la figure 134, où l'uniformité de la teinte indique une absence

Fig. 134.

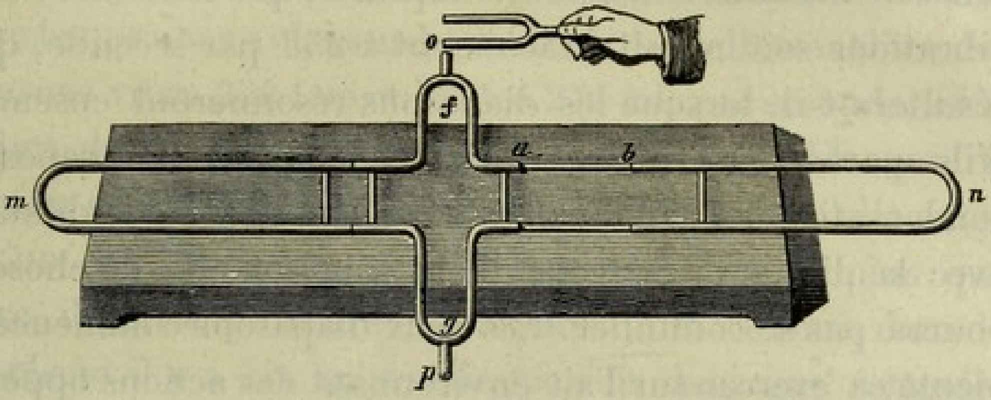


complète de condensations et de raréfactions. Lorsque la distance entre les deux branches A et B est égale à deux demi-longueurs d'onde, il y a coïncidence, comme nous l'avons déjà vu; lorsqu'elle est égale à trois demi-longueurs d'onde, il y a interférence. En général, nous avons coïncidence ou interférence, suivant que la distance entre les deux branches est égale à un nombre pair ou à un nombre impair de demi-longueurs d'onde. C'est exactement ce qui a lieu pour les ondes lumineuses. Si par une cause quelconque un système d'ondes éthérées est en arrière sur un autre d'un nombre pair quelconque de demi-longueurs d'onde, ces deux systèmes se renforcent l'un l'autre, au moment où ils coïncident, et nous avons plus de lumière. Mais si l'un des systèmes est en arrière de l'autre d'une demi-ondulation, ils interfèrent l'un avec l'autre, et de leur coïncidence il résulte une destruction de lumière.

Sir John Herschel proposa le premier de diviser un courant de son en deux courants de différentes longueurs, et de réunir ensuite ses deux branches pour faire interférer les deux courants. Cette idée a été récemment réalisée avec succès par M. Quincke, et plus tard par M. Kœnig avec des perfectionnements nouveaux. Le principe sur lequel s'appuient ces expériences est très-nettement indiqué par la figure 135. Le tube *of* se divise en *f* en deux branches, dirigées l'une vers *m*, l'autre vers *n*, et réunies ensuite pour aboutir à un canal commun *gp*. La portion *bn* des branches peut glisser le long de *ab* de sorte qu'on puisse l'allonger ou la raccourcir comme l'indique la figure, et faire que les deux ondes sonores parcourent dans les deux branches des chemins différents.

Plaçons un diapason vibrant en *f*, et l'oreille en *p*. Lorsque les deux branches sont de même longueur, les ondes qui les parcourent atteignent l'oreille ensemble et l'on entend le son du diapason. Mais en tirant sur la partie mobile *b n*, on arrive bientôt à un point où le son du diapason s'éteint. Cela a lieu lorsque la distance *ab* est égale à un quart de

Fig. 135.



longueur d'onde, ou, en d'autres termes, lorsque la double branche du côté droit est plus longue d'une demi-longueur d'onde que la double branche du côté gauche. Si l'on écarte *bn* davantage, le son renaît peu à peu, et quand la distance *ab* est devenue égale à une longueur d'onde entière, il atteint son maximum. Ainsi, suivant que la différence des deux branches est égale à une demi-longueur d'onde, ou à une longueur d'onde entière, nous avons une interférence ou une coïncidence des deux séries d'ondes sonores. Dans la pratique le tube *of* doit être prolongé autant qu'il le faut pour qu'on n'entende pas le son direct du diapason, l'attention de l'oreille devant être entièrement concentrée sur les sons qui arrivent par le tube.

On comprend qu'on puisse déterminer sans peine avec cet instrument la longueur d'onde d'un ton simple quelconque. Il suffit pour cela de mesurer la différence de chemin parcouru qui produit une interférence complète. Le double de cette différence est la longueur de l'onde cherchée, et si l'on connaît en même temps la vitesse de vibration, on pourra calculer la vitesse du son dans l'air.

Chacun des deux diapasons placés maintenant sous vos yeux exécute 256 vibrations par seconde, et lorsqu'on les fait résonner ensemble vous avez la sensation d'un flot parfait d'unisson. Surchargeons l'un d'eux avec un petit morceau de cire, et faisons-le vibrer ainsi un peu moins vite que son voisin. Admettons, pour simplifier, que le nombre de ses vibrations soit réduit exactement à 255 par seconde, qu'en résultera-t-il, lorsque les diapasons résonneront ensemble ? S'ils partent au même instant de l'état de repos, la condensation coïncidant avec la condensation, et la dilatation avec la dilatation, il est évident que cet état de choses ne pourra pas se continuer. Les deux diapasons commenceront bientôt à exercer sur l'air environnant des actions opposées. A la 128ᵉ vibration, leurs phases seront en opposition complète, l'un d'eux ayant gagné une demi-vibration sur l'autre. Alors, l'un des diapasons engendre une condensation, tandis que l'autre engendre une dilatation, et la conséquence est qu'en ce point particulier *a*, les deux diapasons se neutralisent mutuellement, et que nous n'avons plus de son. Mais à partir de ce point, les deux diapasons se renforcent l'un l'autre de plus en plus, jusqu'à ce que, au bout d'une seconde, l'un ayant accompli 256, l'autre 255 vibrations, l'état des choses soit le même qu'au commencement. La condensation coïncide alors avec la condensation, la dilatation avec la dilatation, et les deux sons produisent leur plein effet sur l'oreille.

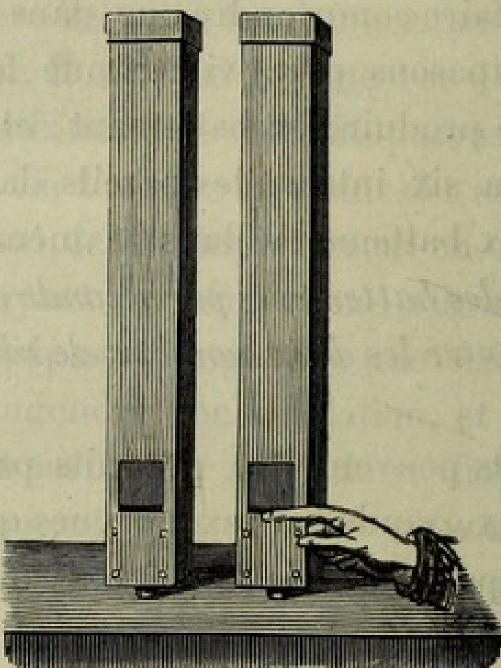
Il est tout à fait évident que, dans de semblables circonstances, nous ne pouvons plus avoir un effluve continu d'unisson. Nous avons au contraire une suite alternative de renforcements et d'affaiblissements du son. Nous obtenons, en définitive, l'effet connu des musiciens sous le nom de *battements*, et ces battements sont, comme nous venons de l'expliquer, un résultat d'interférence.

Chargeons ce diapason d'un poids plus lourd, en ajoutant à la cire une pièce de cinquante centimes; les coïncidences et les interférences se suivent l'une l'autre plus rapidement, et la succession des battements est plus précipitée. Dans notre dernière expérience, l'un des diapasons accomplissait une vibration de plus que l'autre dans une seconde, et dans le même temps nous avions un battement. Actuellement l'un des diapasons vibre 250 fois et l'autre 256 fois par seconde, et le nombre des battements est de 6 par seconde. Un peu de réflexion suffit à faire comprendre que, dans l'intervalle exigé par l'un des diapasons pour vibrer une fois de plus que l'autre, il doit se produire un battement; et comme dans le cas présent il y a six intervalles pareils dans une seconde, on doit avoir six battements dans le même temps. En un mot, *le nombre des battements par seconde est toujours égal à la différence entre les deux nombres de vibrations des sons rendus.*

Ces battements peuvent être produits par tous les corps sonores. Les deux grands tuyaux d'orgues que vous avez devant vous, lorsqu'on les fait sonner ensemble, donnent des battements très-intenses. Vous remarquez que l'un d'eux est un peu plus long que l'autre. Ces deux autres tuyaux sonnent parfaitement à l'unisson, parce que leurs longueurs sont parfaitement égales. Mais il me suffit de placer mon doigt près de l'embouchure de l'un de ces tuyaux (*fig.* 136), pour ralentir ses vibrations et produire les battements pressés et intenses que vous entendez. De même, si je place ma main au-dessus de l'ouverture supérieure de l'un, je diminue aussi sa vitesse de vibration, et je produis des battements qui se suivent l'un l'autre avec une rapidité croissante, à mesure que ma main réduit davantage l'orifice supérieur du tuyau. En soufflant avec plus de force, je fais résonner les deux premiers harmoniques des tuyaux. Les notes plus élevées interfèrent à leur tour, et vous entendez ces battements plus aigus.

On ne peut pas donner de ce phénomène une démonstration plus frappante que celle qui est fournie par deux flammes chantantes. Vous avez sous les yeux deux de ces flammes, et les tubes qui les entourent sont munis de curseurs à coulisses. Il n'y a pas de battements, parce que les tubes ne sont

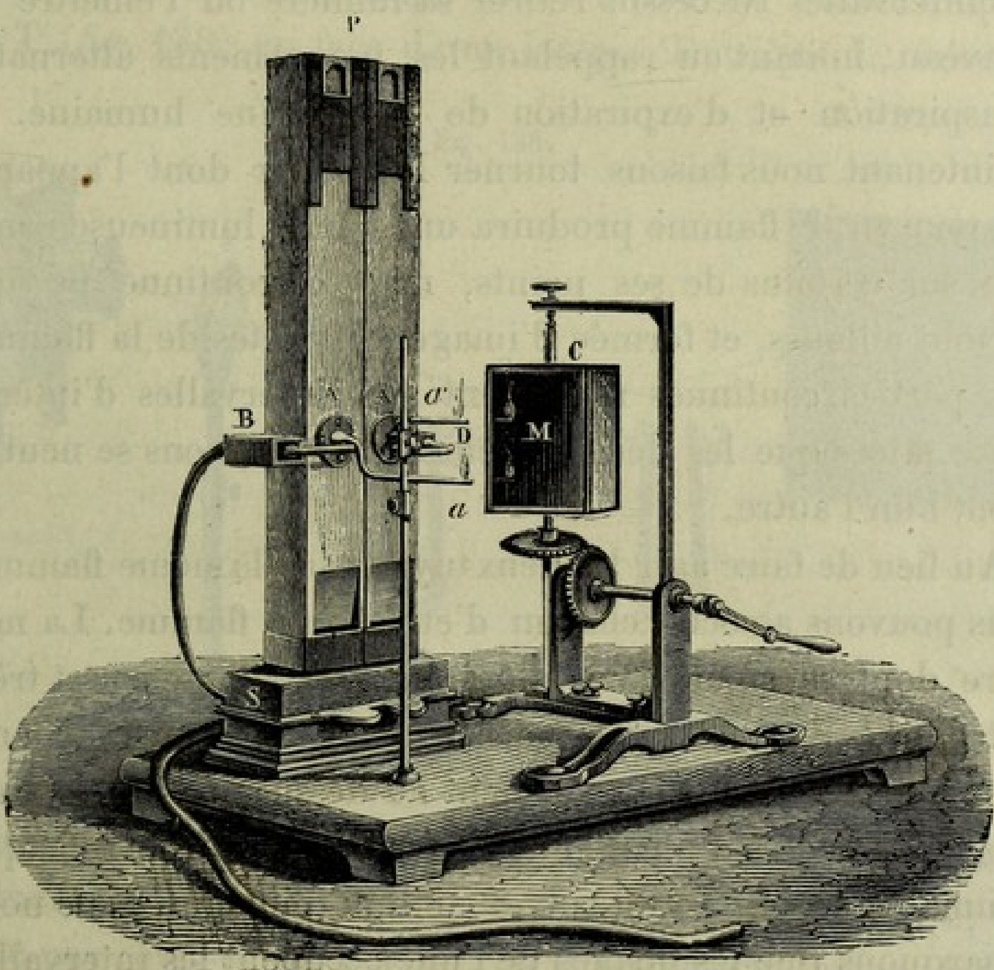
Fig. 136.



pas assez près de l'unisson. J'allonge graduellement le tube le plus court en faisant glisser son curseur, et voici que vous entendez d'abord des battements rapides; ils deviennent ensuite plus rares, encore plus rares. Les flammes actuellement chantent à l'unisson parfait. Continuant le mouvement ascendant du curseur, je rends le tube trop long; les battements recommencent, et ils s'accélèrent jusqu'à ce qu'enfin leur succession soit devenue assez rapide pour ne plus produire sur l'oreille que l'effet d'un son dur. Les flammes, vous le voyez, dansent dans leurs tubes synchroniquement avec les battements. Ainsi que nous l'avons précédemment constaté, ces battements amènent une flamme silencieuse au sein de son tube à s'agiter lorsque la voix émet la note convenable, et à chanter quand la position de la flamme a été bien choisie. Avec les flammes de nos grands becs en forme de roses, et des tubes de fer-blanc de 1 à 3 mètres de longueur, nous obtenons des battements d'une force prodigieuse.

Vous avez entendu les battements produits par deux tuyaux d'orgue presque à l'unisson [1]. En voici deux autres semblables (*fig.* 137), mais pourvus chacun en son milieu

Fig. 137.



d'une membrane ayant pour fonction d'agir sur une flamme. Deux petits tubes partent des espaces fermés par les membranes et se réunissent ensuite, mettant les membranes des deux tuyaux d'orgue en communication avec une même flamme. Au moyen des curseurs s, s', placés près des som-

[1] Voy. la Leçon V.

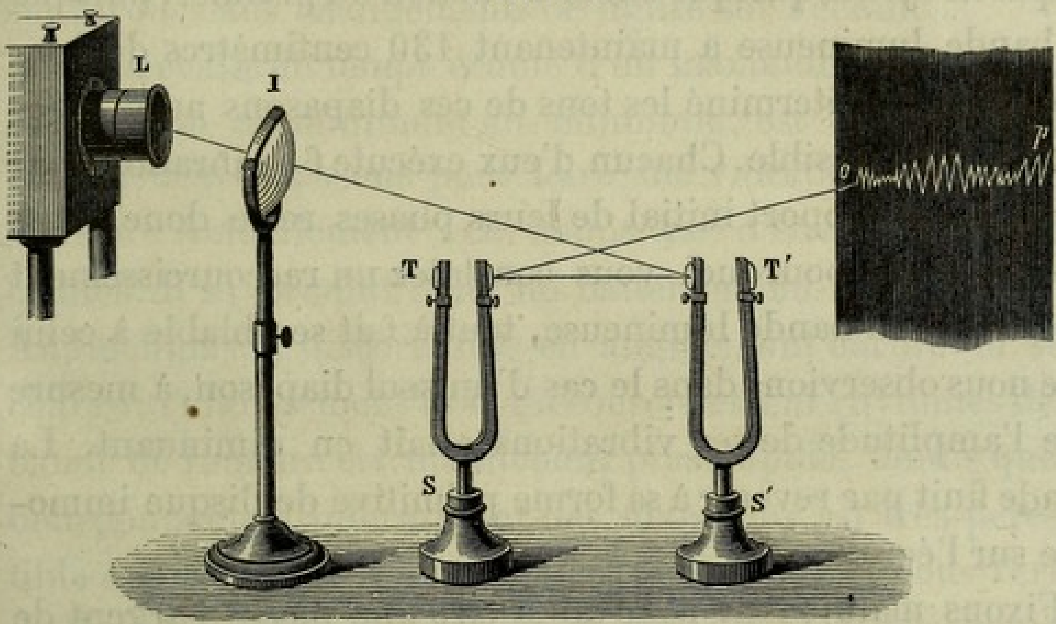
mets des tuyaux, on les met à volonté à l'unisson ou hors de l'unisson.

Faisons sonner les deux tuyaux, ils ne sont pas à l'unisson, et les battements qu'ils produisent se suivent très-rapidement ; tandis que la flamme en communication avec les membranes centrales danse en cadence avec ces battements. Amenons les tuyaux plus près de l'unisson, les battements sont plus lents à se produire, et nous voyons la flamme à des intervalles successifs retirer sa lumière ou l'émettre de nouveau, imitant ou rappelant les mouvements alternatifs d'inspiration et d'expiration de la poitrine humaine. Si maintenant nous faisons tourner le miroir dont l'appareil est pourvu, la flamme produira une bande lumineuse continue sur certains de ses points, mais discontinue presque partout ailleurs, et formée d'images distinctes de la flamme. Les parties continues répondent aux intervalles d'interférence, alors que les deux systèmes de vibrations se neutralisent l'un l'autre.

Au lieu de faire agir les deux tuyaux sur la même flamme, nous pouvons associer chacun d'eux à une flamme. La manière dont se comportent alors les deux flammes est très-instructive. Supposons-les placées toutes deux sur une même ligne verticale, l'une exactement au-dessus de l'autre. Mettons les tuyaux à l'unisson et tournons le miroir ; chaque flamme se résout en un ruban continu d'images. Mais nous remarquons que les images de l'une occupent les intervalles qui séparent les images de l'autre. Les périodes d'extinction d'une flamme correspondent donc aux périodes de résurrection de l'autre. L'expérience prouve, en effet, que lorsque deux tuyaux à l'unisson sont ainsi placés l'un près de l'autre, leurs vibrations sont toujours dans des phases opposées. La conséquence de ce fait est que les deux systèmes de vibrations se neutralisent l'un l'autre d'une manière permanente, de sorte qu'à une petite distance des tuyaux on n'entend le son fondamental d'aucun d'eux. Pour cette raison, il n'y aurait aucun avantage à placer près l'un de l'autre, dans une orgue, plusieurs tuyaux de même ton fondamental.

Dans les cas de battements, l'amplitude des oscillations de l'air atteint périodiquement un maximum et un minimum. Au moyen de la belle méthode de M. Lissajous, nous pouvons mettre en évidence optiquement ces augmentations et diminutions alternatives d'amplitude. Plaçons un grand diapason T′ (*fig.* 138) en face d'une lampe électrique L ; faisons

Fig. 138.



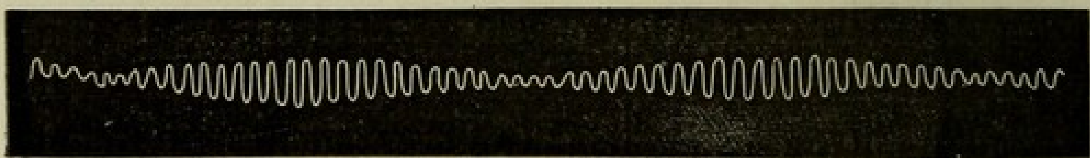
tomber sur le miroir du diapason T′ un faisceau de rayons lumineux, réfléchi sur le miroir d'un second diapason T, et rejeté par celui-ci sur l'écran, où il forme un disque lumineux. Vous remarquerez que dans cette expérience les deux diapasons sont placés debout. Excitons avec l'archet le diapason T′ ; le faisceau lumineux, comme dans l'expérience de la seconde leçon, oscille de bas en haut, tandis que le disque sur l'écran s'étale sous forme de bande lumineuse d'un mètre de longueur. Excitons maintenant le diapason T; en y réfléchissant quelque peu vous comprendrez que l'un des diapasons peut vibrer d'accord ou en opposition avec l'autre, et que par conséquent la bande lumineuse de l'écran peut être tantôt plus longue tantôt plus courte. Qu'elle soit donc longue ou courte, ce n'est en tout cas qu'un accident. Si, en excitant le second diapason avec l'archet, nous faisons que les phases des deux séries de vibrations soient les mêmes, nous allongerons la bande lumineuse; si au contraire les phases s'étaient trouvées en opposition, il en serait résulté une neutralisation totale ou partielle des vibrations de l'un des diapasons par les vibrations de l'autre, et la bande serait raccourcie. Il se trouve que dans le cas actuel le second diapason ajoute quelque chose à l'action du premier, puisque la bande lumineuse a maintenant 130 centimètres de longueur. On a déterminé les tons de ces diapasons aussi exactement que possible. Chacun d'eux exécute 64 vibrations par seconde; le rapport initial de leurs phases reste donc constant, et voilà pourquoi vous constatez un raccourcissement graduel de la bande lumineuse, tout à fait semblable à celui que nous observions dans le cas d'un seul diapason, à mesure que l'amplitude de ses vibrations allait en diminuant. La bande finit par revenir à sa forme primitive de disque immobile sur l'écran.

Fixons maintenant avec de la cire une pièce d'argent de vingt centimes à la branche de l'un de ces diapasons, et diminuons ainsi la vitesse de ses vibrations. Les phases des deux diapasons ne peuvent plus alors conserver entre elles un rapport constant. Un des deux gagne incessamment sur l'autre, et par suite il arrive que les phases tantôt coïncident et tantôt sont en opposition. Regardez l'écran. En ce moment, les phases coïncident, et nous avons une bande lumineuse longue de 130 centimètres. Cette bande se contracte lentement, elle se réduit à un disque, mais seulement pour un instant, qui est l'instant de l'opposition. Cet instant passé, les diapasons commencent de nouveau à se renforcer l'un l'autre, et le disque s'étale de nouveau en bande lumineuse. L'action est très-lente. Accélérons-la en attachant une pièce de 50 centimes au diapason surchargé. La bande de lumière s'étale et se contracte dans un rhythme parfait. Quand elle a son maximum de longueur les deux diapasons s'accordent; sa longueur est la plus courte quand les phases sont en opposition. L'action que la lumière rend ainsi visible au regard est comme imprimée sur l'air de cette salle. Ses particules sont alternativement en repos et en mouvement; et voilà pourquoi l'oreille perçoit des battements parfaitement synchrones aux changements de figure sur l'écran.

L'intervalle de temps écoulé d'un maximum au maximum suivant, ou du minimum au minimum, est le temps exigé par un des diapasons pour faire une vibration de plus que l'autre. Actuellement, ce temps est d'environ deux secondes. Il se produit donc un battement en deux secondes. Augmentons la discordance en augmentant encore la surcharge; l'allongement et le raccourcissement rhythmés de la bande de lumière est maintenant plus rapide, tandis que le bourdonnement intermittent des diapasons est très-perceptible à l'oreille. Si vous regardez à vos montres, vous verrez qu'il y a maintenant six allongements et raccourcissements dans ce même intervalle de deux secondes, là où nous n'en avions d'abord qu'un seul; vous entendez en même temps trois battements par seconde. Si l'on continuait à augmenter la charge du diapason, les transformations successives de la figure deviendraient si rapides que l'œil ne pourrait plus les suivre, en même temps que les battements n'apporteraient à l'oreille qu'une sensation de dureté.

Dans les expériences avec un seul diapason de notre seconde leçon, nous recevions sur un miroir le rayon réfléchi par le diapason, et en faisant tourner le miroir nous transformions la bande de lumière de l'écran en une ligne lumineuse ondulée. Je vous ai expliqué, à cette époque, que l'intensité du son dépendait de la profondeur des dentelures de cette ligne. Dans le cas actuel, nous avons un son, non plus continu, mais intermittent. Si donc l'amplitude représente l'intensité du son, et si nous étalons en ligne lumineuse l'image que vous avez sous les yeux, les sinuosités devront être plus profondes sur certains points, et s'évanouir presque sur d'autres points. C'est ce qui a lieu en effet. Par un léger contact, je fais tourner d'un très-petit angle, avec précaution, le miroir du diapason T, et vous voyez apparaître une ligne sinueuse, formée de parties alternativement renflées et contractées, indiquées en partie figure 138, et plus complétement figure 139, les renflements correspondant aux périodes de coïncidence, et les contractions aux périodes d'interférence[1].

Fig. 139.



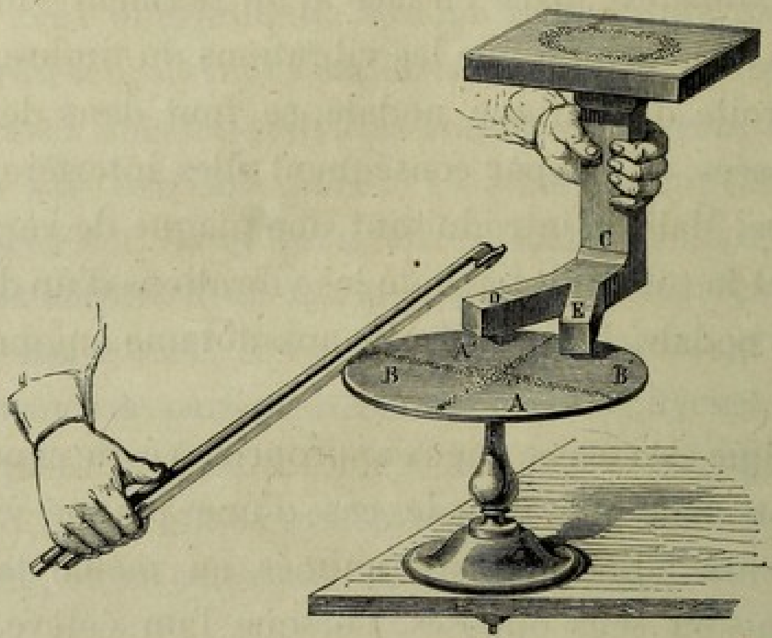
Nous avons donc amplement démontré ce fait général, que deux corps vibrants, dont chacun produirait, s'il était seul, un son musical, peuvent, quand on les fait agir simultanément, neutraliser mutuellement leur action. Il en résulte que lorsque deux corps vibrants se neutralisent ainsi l'un l'autre, on peut, en étouffant les vibrations de l'un d'eux, rendre à l'autre sa sonorité effective. Il arrive souvent que lorsque deux diapasons vibrent ensemble sur leurs caisses renforçantes, l'arrêt de l'un d'eux est accompagné de l'augmentation du son de l'autre. Nous pouvons éclairer ce fait d'un jour suffisant

[1] La figure n'est qu'une représentation ébauchée du fait. La bande de lumière avait 5 centimètres de largeur, et la profondeur des sinuosités variait de zéro à un mètre.

en recourant au timbre sur lequel nous avons expérimenté dans notre quatrième leçon. Lorsqu'on place le tube renforçant en face de l'un des nœuds du timbre, on perçoit un son, mais qui n'est nullement comparable à celui qui retentit lorsque le tube est placé en face d'un segment vibrant ou ventre. La raison en est que les vibrations du timbre, à gauche et à droite d'une ligne nodale, se font dans des directions opposées, et que par conséquent elles interfèrent l'une avec l'autre. Mais en introduisant une plaque de verre entre le timbre et le tube, j'intercepte les vibrations d'un des côtés de la ligne nodale, et il en résulte aussitôt une augmentation de son.

Une plaque est encore mieux appropriée à cette expérience. Vous savez déjà que, dans le cas d'une plaque vibrante, deux secteurs adjacents sont animés en même temps de mouvements en sens opposés. Lorsque l'un s'élève, 'autre s'abaisse, la ligne nodale marquant la limite où il n'y a ni élévation ni abaissement. Par conséquent, du moment où l'un quelconque des secteurs produit la condensation dans l'air situé au-dessus de lui, le secteur adjacent produit la raréfaction de ce même air, et il en résulte une interférence, ou la destruction partielle l'un par l'autre des sons engendrés par les secteurs. Et permettez-moi de vous présenter, à cette occasion, l'instrument par lequel feu M. William Hopkins démontrait le principe des interférences. Le tube C (*fig.* 140) se divise en deux branches au point C. Son ouverture supérieure est fermée par une membrane. On répand du sable sur cette membrane, et tenant les orifices des deux branches sur deux secteurs *adjacents* d'un disque vibrant, on n'aperçoit dans le sable aucun mouvement (ou, s'il y a quelque mouvement, il est extrêmement faible). Dans ce cas, en effet, les ondes sonores émises par les deux secteurs se neutralisent sensiblement, parce que les vibrations qui les engendrent sont égales et de sens contraires. Mais quand on place les deux branches sur deux secteurs,

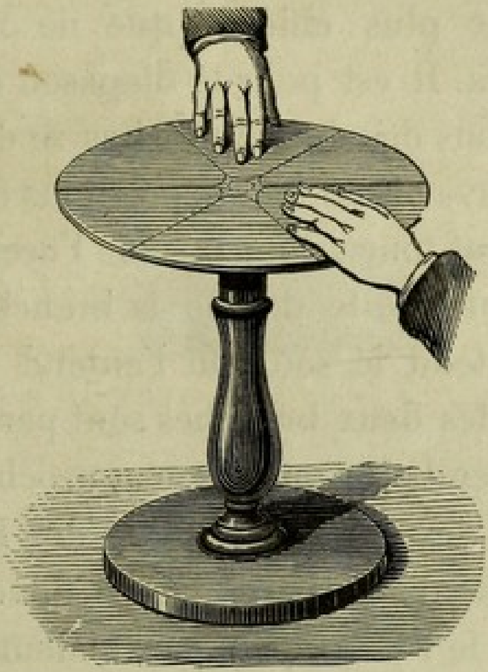
Fig. 140.



non plus contigus, mais alternés, comme les mains dans la figure 141, le sable saute sur la membrane, ce qui indique, dans ce cas, la coïncidence des vibrations des deux secteurs.

Nous sommes maintenant préparés à bien saisir la belle et instructive expérience que nous devons à M. Lissajous. Faisons que ce disque de laiton se partage en six secteurs vibrants. Posant la palme d'une main tout près de l'un quelconque de ces secteurs sans le toucher, j'intercepte ses vibrations; le son est augmenté. Je place mes deux mains sur deux secteurs adjacents, vous ne constatez aucune augmentation du son. Je place les deux mains sur deux secteurs alternés, comme dans la figure 141, il en résulte une augmentation notable du son. En élevant et abaissant tour à tour les mains, je produis des variations considérables dans l'intensité du son; par l'abaissement des mains, j'intercepte les vibrations des deux secteurs : les interférences qu'ils causent à droite et à gauche sont ainsi supprimées, et les secteurs restants sonnent avec plus d'intensité. Quand je promène

Fig. 141.



une seule main çà et là sur la surface, vous entendez le son se renforcer et s'affaiblir successivement : il se renforce, quand ma main passe sur un secteur vibrant ; il s'affaiblit, quand elle passe sur une ligne nodale. Ainsi, en sacrifiant une partie des vibrations, nous rendons celles qui restent plus efficaces. On fait des expériences analogues sur la lumière et la chaleur rayonnante. Quand deux rayons de lumière se détruisent l'un l'autre par interférence, il suffit d'en supprimer un pour faire succéder la lumière aux ténèbres ; et si on intercepte un des deux rayons de chaleur qui interfèrent, la chaleur prend la place du froid.

Vous avez dû remarquer l'absence presque totale de son d'un diapason qu'on tient librement à la main. Le faible pouvoir sonore du diapason a pour cause en grande partie l'interférence. Les deux branches vibrent toujours en sens opposés, produisant l'une la condensation, l'autre la raréfaction de l'air, et il en résulte nécessairement une destruction de son. En entourant simplement une des branches d'un tube en carton, on intercepte en partie ses vibrations et la quantité de son devient plus grande ! Une seule branche se montre donc plus efficace que ne l'étaient les deux branches réunies. Il est pour le diapason des positions dans lesquelles les sons des deux branches se détruisent mutuellement. On trouve aisément ces positions en excitant le diapason et le faisant tourner en face de l'oreille autour de son axe vertical. Lorsque le dos de la branche est parallèle à l'oreille, on entend le son ; on l'entend encore quand les faces latérales des deux branches sont parallèles à l'oreille ; mais on ne l'entend plus quand on approche avec précaution de l'oreille une des arètes ou angles des branches. Dans la rotation complète du diapason, il est donc quatre positions pour lesquelles le son est presque totalement éteint.

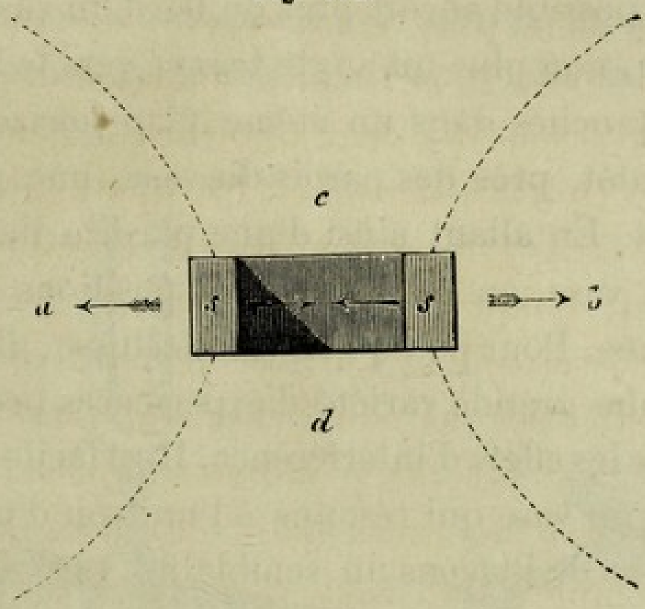
Soient s, s' (*fig.* 142) les deux extrémités des branches d'un diapason vu d'en haut lorsqu'il est debout.

Quand l'oreille est placée en *a* ou en *b*, en *c* ou en *d*, elle entend le son. Au contraire sur le contour des courbes ponctuées, les ondes engendrées par les deux branches se neutralisent complétement l'une l'autre, et par conséquent le long de ces lignes l'oreille n'entend rien.

Wéber a démontré que ces lignes sont des arcs d'hyperbole ; et tel doit être en effet leur caractère, dans la théorie des interférences.

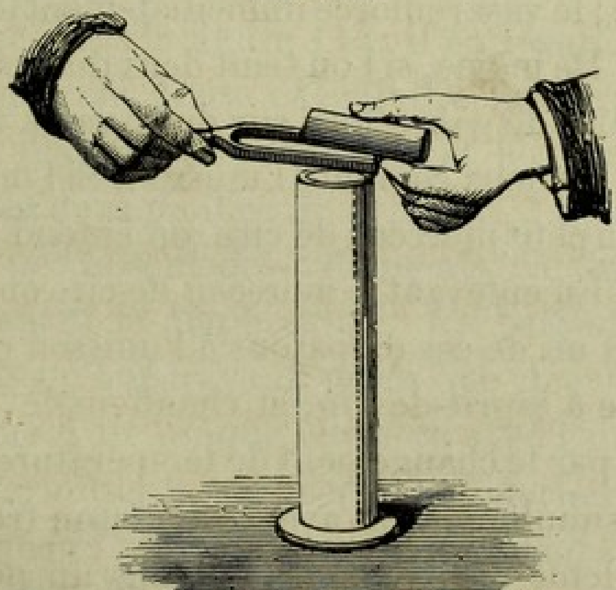
Ce cas remarquable d'interférence, signalé d'abord par Thomas Young, puis étudié à fond par les frères Wéber, peut être facilement rendu sensible à tous en mettant en jeu la résonnance d'un cylindre en verre qui retentit (*fig.* 143) avec force à l'unisson de ce diapason. Plaçant le diapason au-dessus du cylindre, je le fais tourner lentement ; vous constatez que le son est très-renforcé dans quatre positions, presque éteint dans quatre autres, et que la rotation du diapason est accompagnée de variations d'intensité du son tantôt faible, tantôt fort. Quand le diapason est au-dessus du cylindre avec une de

Fig. 142.



ses arêtes ou angles dièdres en bas, et que j'entoure une des branches d'un tube de carton (*fig.* 143), une résonnance

Fig. 143.

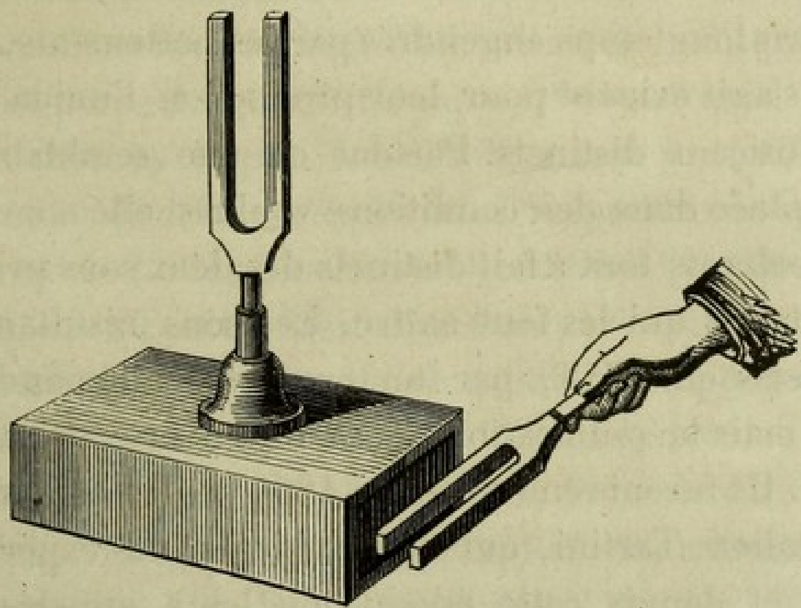


retentissante annonce aussitôt la suppression des vibrations de cette branche. Pour assurer cet effet, il faut tenir le diapason au-dessus du centre du cylindre, de telle sorte que l'air soit symétriquement distribué des deux côtés. En faisant mouvoir le diapason du centre vers un des côtés, sans rien changer à son inclinaison, on entend un son intense. Toutefois, l'interférence est possible encore près du bord du vase. Si l'on tient le diapason, non plus un angle tourné vers le bas, mais avec les deux branches dans un même plan horizontal, on rencontre bientôt, près des parois du vase, une position où le son s'éteint. En allant ainsi d'une paroi à l'autre à travers l'orifice du vase, on découvre deux positions d'interférence très-marquée. Pour peu qu'on y réfléchisse, il se présentera à l'esprit une grande variété d'expériences propres à mettre en évidence les effets d'interférence. Il est facile, par exemple, de trouver un vase qui résonne à l'unisson d'une plaque vibrante donnée. Plaçons un semblable vase au-dessus d'un segment vibrant de cette plaque, la résonnance est très-énergique. Plaçons le vase au-dessus d'une ligne nodale, la résonnance n'existe plus. Interposons un carton entre le vase et la plaque, de manière à arrêter les vibrations d'un côté de la ligne nodale ; le vase renforce immédiatement les vibrations de l'autre côté. De même, si l'on tient deux diapasons qui font le même nombre de vibrations sur deux vases résonnants, les sons de tous les deux coulent à l'unisson. Si l'on fixe à l'un des diapasons un petit morceau de cire, on entend des battements énergiques. En enlevant le morceau de cire on rétablit l'unisson. Plaçons un de ces diapasons à l'unisson dans la flamme d'une lampe à esprit-de-vin, et chauffons-le : son élasticité est modifiée par le changement de température, et le voici qui en vibrant simultanément avec le diapason froid produit des battements lents et forts. Surchargeons un peu le diapason froid, l'unisson est rétabli ; la chaleur avait donc diminué l'élasticité de l'acier[1]. Je refroidis maintenant le diapason,

[1] Dans ses admirables expériences sur les diapasons, Scheibler a trouvé dans les battements un témoin très-délicat de la différence des températures.

je l'installe sur sa caisse renforçante, et je l'excite avec l'archet; le bois et l'air de la caisse résonnent tous deux. La caisse, en effet, est construite de telle sorte que l'air qu'elle contient résonne à l'unisson du diapason. Je charge un peu l'autre diapason, et après l'avoir excité, je l'approche de l'orifice de

Fig. 144.



la caisse, comme dans la figure 144 : il en résulte des battements énergiques. Je divise ce cylindre en deux compartiments par un diaphragme vertical, et je place les deux diapasons sur les deux moitiés du cylindre. Les deux demi-cylindres d'air produisent des battements par interférence. J'enlève maintenant le diaphragme ; les battements continuent aussi forts qu'auparavant, parce que chacune des moitiés de la colonne d'air unique interfère avec l'autre[1].

Les sons intermittents de certaines cloches, que l'on entend surtout quand les vibrations commencent à s'éteindre, sont des effets d'interférence. La cloche, par défaut de symétrie, comme nous l'avons expliqué dans la quatrième leçon, vibre dans une direction plus rapidement que dans

[1] M. Wheastone et Sir John Herschell ont fait cette expérience, chacun séparément.

l'autre, et la coexistence de ces deux séries de vibrations de périodes différentes produit nécessairement des battements.

TONS RÉSULTANTS.

Passons maintenant de la question des interférences à la considération d'une nouvelle classe de sons musicaux que l'on a cru longtemps engendrés par les battements. Les sons dont il s'agit exigent pour leur production l'union de deux sons musicaux distincts. Partout où une semblable union trouve place dans des conditions voulues, elle engendre des sons résultants tout à fait distincts des deux sons primitifs ou élémentaires qui les font naître. Les sons résultants furent découverts en 1745, par un organiste allemand nommé Sorge, mais la publication de sa découverte attira peu l'attention. Ils furent remarqués en 1854 par un célèbre violoniste italien, Tartini, qui ne savait rien des expériences de Sorge, et depuis cette époque on les a appelés sons de Tartini.

Pour les produire il est bon, sinon nécessaire, que les deux tons primitifs aient une grande intensité. Helmholtz préfère la sirène à tout autre moyen de les faire naître, et on les obtient sans peine avec cet instrument. Il faut d'abord un certain degré d'attention de la part de celui qui écoute pour arriver à séparer le son résultant de la masse générale des sons; mais avec un peu de pratique on le fait sans peine, et alors même qu'une oreille non exercée ne réussit pas d'abord à faire cette analyse du son, elle constate du moins que le timbre est évidemment influencé par le mélange des sons résultants. Voici une sirène de Dove, je la fais tourner et j'ouvre à la fois deux séries de trous. Malgré toute l'attention dont je suis capable, je ne puis saisir le moindre symptôme d'un ton résultant. J'augmente la vitesse de rotation de l'instrument, et je commence à saisir un bourdonnement lent et sourd mêlé aux deux sons primitifs. Je fais tourner l'instrument encore plus vite, et voici que le lent bourdonnement monte rapidement de ton; pour moi, placé tout près de l'instrument, c'est un son musical très-perceptible. Les deux séries de trous ouverts sont celles de huit et de douze trous. Et dans ce cas, le son résultant est précisément celui que l'on obtiendrait si le disque en rotation était percé de quatre trous, c'est-à-dire qu'il est à l'octave au-dessous du plus bas des deux tons primitifs. J'ouvre maintenant les deux séries formées respectivement de douze et seize trous. Le ton résultant est cette fois parfaitement saisissable, et on l'obtiendrait de même par une série de quatre trous percés dans le disque en rotation. Sa période de vibration est donc le tiers de celle du plus grave des deux sons primitifs. J'ouvre encore deux séries, l'une de dix, l'autre de seize trous. Le son résultant qu'ils font naître serait produit par la rotation d'un disque percé de six trous.

Dans tous ces cas, *le son résultant est celui qui correspond à une vitesse de vibration égale à la différence des vitesses de vibration des deux sons primitifs.*

Quand je parle ici du son résultant, j'entends celui que l'on entend actuellement dans l'expérience. Mais ce n'est pas le seul qu'on puisse entendre. Avec des moyens d'expérience plus délicats, on démontre l'existence d'autres sons de même nature. Ceux sur lesquels nous venons de fixer notre attention sont toutefois les plus importants. Helmholtz les appelle *sons de différence,* en raison de la loi ci-dessus énoncée.

Ainsi que je l'ai déjà dit, les sons résultants ne sont perceptibles qu'autant que les sons primitifs ont une grande intensité. On ne les entend plus lorsque cette intensité est faible. Pour les produire, il n'est pas de moyen plus simple et plus efficace que le recours à deux flammes chantantes convenablement choisies. Voici deux flammes de gaz ordinaire d'éclairage, sur lesquelles je place deux tubes de verre munis de curseurs en papier qui permettent de faire varier leurs longueurs entre certaines limites. En ce moment ces deux flammes émettent des sons énergiques qui naissent d'eux-mêmes, qui se maintiennent eux-mêmes, qui n'exigent pour leur entretien aucun effort musculaire de la part de l'observateur. La longueur actuelle du tube le plus court est de 26,3 centimètres, et celle du plus long de 29 centimètres. Je prête l'oreille, et au milieu des sons aigus je distingue un son résultant très-grave. La raison de sa gravité est évidente : les deux tubes ayant presque la même longueur, la différence entre leurs nombres de vibrations est très-petite, et la note correspondante à cette différence par conséquent très-basse. Mais j'allonge l'un des tubes en faisant glisser le curseur ; le son résultant s'élève graduellement, et le voici qui s'enfle assez pour être entendu de plusieurs d'entre vous. Je raccourcis le tube, le ton résultant redescend aussitôt ; de cette manière, en élevant et abaissant tour à tour le curseur, je fais monter ou descendre le son résultant conformément à la loi qui veut que le nombre de ses vibrations soit la différence entre les nombres de vibrations des deux sons primitifs.

Nous pouvons déterminer sans peine le nombre réel des vibrations correspondantes à l'un quelconque de ces tons résultants. Le son de la flamme est celui du tube ouvert qui l'entoure, et nous savons que la longueur d'un semblable tube est la moitié de celle de l'onde sonore qu'il engendre. En conséquence, la longueur d'onde correspondante à notre tube de 26,3 centimètres est 52,6 centimètres. La vitesse du son dans l'air à la température de cette salle est de 341 mètres 37 centimètres par seconde. Divisant cette valeur par 52,6, nous trouvons que le nombre des vibrations correspondantes à une longueur de 26,3 centimètres est de 648 par seconde.

Mais nous ne devons pas oublier que l'air dans lequel s'accomplissent ici les vibrations est beaucoup plus élastique que l'air de cette chambre. La flamme échauffant l'air du tube, les vibrations doivent y être plus rapides qu'elles ne le seraient dans un tuyau d'orgue de même longueur. Pour déterminer le nombre réel des vibrations, force est de revenir à notre sirène : nous trouvons avec cet instrument que l'air intérieur de notre tube de 26,3 centimètres exécute 717 vibrations par seconde. La différence de 66 vibrations par seconde est due à l'échauffement de la colonne d'air. L'acide carbonique et la vapeur d'eau, produits de la combustion, doivent aussi par leur présence au sein du tube modifier un peu le son produit. Déterminée de la même manière, la vitesse de vibration du tube de 29 centimètres est de 667 par seconde. La différence entre 717 et 667 est 50, et elle exprime la vitesse de vibration correspondante au premier de nos tons résultants.

Mais ce nombre 50 n'est pas encore la limite de l'audibilité. Laissant à l'un des tubes sa longueur de 29 centimètres, j'allonge son voisin jusqu'à ce que le ton résultant s'abaisse très-près de la limite de sensibilité de mon oreille, sans dépasser cependant le point où la certitude de la perception cesserait. Le tube le plus court a maintenant 27,9 centimètres, et j'entends encore parfaitement le ton grave du son résultant. Le nombre de vibrations exécutées dans ce tube de 27,9 centimètres se trouve être de 700 par seconde. Nous avons déjà trouvé 667 pour le nombre des vibrations dans le tube de 29 centimètres. Donc, $700 - 667 = 33$ est le nombre de vibrations correspondant au ton résultant que j'entends bien quand je concentre sur lui mon attention. Nous sommes ici très-près de la limite que Helmholtz a fixée à l'audibilité des sons musicaux. Je prends encore un tube de 44,1 centimètres de longueur, et je combine le son qu'il rend avec celui du tube de 26,3 centimètres. La combinaison fait naître un son résultant plus élevé qu'aucun de ceux que nous avons déjà entendus. Or, le nombre réel de vibrations effectuées dans ce long tube est de 459; et nous avons trouvé 717 vibrations pour notre tube de 26,3 centimètres. Donc, 717 — 459 = 258 est le nombre de vibrations correspondant au son résultant que nous entendons actuellement. Ce son est presque exactement celui de l'un de nos diapasons, qui exécute, comme vous vous le rappelez, 256 vibrations par seconde.

Profitons de cette coïncidence pour soumettre à un contrôle plein d'intérêt les résultats auxquels nous sommes déjà parvenus. Voici le diapason bien connu de 256 vibrations. Il est monté sur sa caisse résonnante, et je le touche avec l'archet si légèrement que le son se fait à peine entendre; ses vibrations réagissent immédiatement sur celles du son résultant, et vous entendez clairement les battements que leur combinaison fait naître. En chargeant un peu le diapason pour modifier le ton du son qu'il rend, ou bien en élevant un peu le curseur du tube pour faire baisser le son de la flamme, je puis modifier la période des battements, absolument comme je l'ai fait quand je comparais entre eux deux sons primitifs. J'obtiendrais le même effet en faisant varier doucement les dimensions de la flamme; vous ne manquerez pas de constater l'accord merveilleux entre tous ces résultats.

Placé à moitié chemin entre la sirène et la flamme qui rend un son aigu, et faisant monter de plus en plus le ton de la sirène, j'entends bientôt le son résultant qui s'enfle quelquefois et résonne avec une grande énergie. Lorsqu'on fait retentir à côté de la flamme un tuyau d'orgue, on entend le son résultant, mais il semble dans ce cas qu'il naisse au fond de l'oreille, ou mieux dans le cerveau. En élevant ou abaissant le curseur, je fais varier le ton du son résultant conformément à la loi déjà souvent énoncée.

Le tableau suivant donne les sons résultants produits par la combinaison des intervalles harmoniques ordinaires [1].

INTERVALLES	RAPPORT de vibrations.	DIFFÉRENCE	LE TON RÉSULTANT est inférieur au ton primaire le plus bas de :
Octave	1 : 2	1	0
Quinte	2 : 3	1	Une octave.
Quarte	3 : 4	1	Une douzième.
Tierce majeure	4 : 5	1	Deux octaves.
Tierce mineure	5 : 6	1	Deux octaves et une tierce majeure.
Sixte majeure	3 : 5	2	Une quinte.
Sixte mineure	5 : 8	3	Une sixième majeure.

Le célèbre Thomas Young attribuait les tons résultants à la combinaison de battements rapides qui s'ajouteraient ou s'uniraient les uns aux autres comme les pulsations périodiques des notes musicales ordinaires. Cette explication s'accordait avec le fait que le nombre des battements, aussi bien que le nombre de vibrations du ton résultant, est égal à la différence entre les deux nombres de vibrations qui produisent les battements. Elle est cependant insuffisante. Les battements impressionnent l'oreille plus énergiquement qu'aucun son continu. On les entend encore lorsque chacun des deux sons qui les produisent a cessé d'être perceptible. Ce fait dépend en partie de la constitution de l'organe de l'ouïe, en partie aussi de cette particularité que lorsque deux notes de même intensité produisent des

[1] Sujet qui sera traité dans la leçon suivante.

battements, l'amplitude des vibrations de chaque molécule d'air est tantôt détruite, tantôt doublée. Or, doubler l'amplitude, c'est quadrupler l'intensité du son. Donc, lorsque deux notes de même intensité produisent des battements, *le son passe incessamment du silence à un son d'intensité quadruple de celle de l'un ou l'autre des tons interférents.*

Si donc les tons résultants étaient dus aux battements des sons primitifs, ils devraient être entendus dans le cas même où les sons primitifs seraient faibles. Or, dans cette circonstance on ne les entend pas. Ce fait amena M. Helmholtz à étudier de nouveau cette question.

Nous avons déjà eu l'occasion d'établir que lorsque divers sons traversent la même masse d'air, chaque son particulier se propage comme s'il était seul, et qu'au milieu des sons composés chacun des sons élémentaires de la combinaison cause son individualité propre, et rien de plus. Mais cela n'est vrai en toute rigueur que lorsque les amplitudes des molécules oscillantes sont infiniment petites. M. Helmholtz, l'éminent mathématicien, était arrivé à ce résultat par le simple raisonnement.

La loi est encore pratiquement vraie lorsque les perturbations sont *extrêmement* petites ; mais elle ne l'est plus lorsqu'elles dépassent une certaine limite. Les vibrations qui produisent une trop grande agitation donnent naissance à des ondes secondaires, qui font appel à l'oreille comme les tons résultants. Après l'avoir démontré, Helmholtz arrive à conclure qu'il doit y avoir des sons résultants produits par la somme des sons primitifs aussi bien que par leur différence. Il découvrit ainsi ses *tons par sommation* avant de les avoir entendus ; et en interrogeant l'expérience, il trouva que ces tons par sommation ont une existence physique réelle. Ils sont inexplicables dans la théorie de Young, et s'expliquent complétement dans celle de Helmholtz.

Une autre conséquence de cet écart de la loi de superposition est qu'un seul corps sonore, qui agite l'air au-delà des limites de la loi de superposition des vibrations, doit produire aussi des ondes secondaires correspondant aux sons harmoniques du corps vibrant. Par exemple, la vitesse de vibration du premier harmonique d'un diapason est égale à 6 fois et un quart la vitesse de vibration du son fondamental, ainsi que nous l'avons constaté dans la quatrième leçon. Mais Helmholtz a prouvé clairement qu'un diapason qu'on excite, non avec un archet, mais en le frappant avec force contre un tampon, émet l'octave de sa note fondamentale, octave due aux ondes secondaires qui naissent quand les limites de la loi de superposition ont été dépassées.

Ces considérations suffisent à vous prouver que la coalescence ou combinaison des sons composants est un problème de dynamique beaucoup plus complexe que vous ne le pensiez jusqu'ici. Dans une musique d'orchestre, nous avons non-seulement les sons fondamentaux des divers instruments à vent ou à cordes, mais en outre leurs sons harmoniques qui se font entendre quelquefois jusqu'au seizième de la série. Nous avons aussi les sons résultants, les tons de différence et de sommation qui tous vibrent au sein du même air, et viennent tous frapper au même instant la membrane du tympan. Nous avons donc à la fois les interférences des sons fondamentaux avec des sons fondamentaux, des harmoniques avec des harmoniques, des sons résultants avec des sons résultants, puis celles des sons de l'une quelconque de ces classes avec celles des sons des autres classes. L'imagination, répétons-le, est tout-à-fait impuissante, non-seulement à réaliser, mais à se faire la moindre idée physique de l'état dans lequel se trouve une atmosphère, lorsqu'elle livre passage à cette multitude de sons. Et comme, ainsi que nous verrons dans la prochaine leçon, le but de la musique à travers les siècles pendant lesquels elle a fait le charme de l'humanité a été de tout arranger empiriquement, de manière à n'avoir rien à souffrir des dissonances produites par ces innombrables interférences, les artistes engagés dans l'exercice de cet art ne connaissaient rien, ni des faits physiques et expérimentaux, ni des principes théoriques, dont dépend, en réalité, le succès de leurs efforts. Ils n'étaient pas plus initiés à ces connaissances théoriques que les inventeurs de la poudre à canon aux lois des proportions chimiques. Ils essayaient et ils essayaient encore jusqu'à ce qu'ils eussent obtenu un résultat satisfaisant; et maintenant que l'esprit scientifique a été amené à examiner à fond cette question, l'ordre a surgi de la confusion, et les résultats du pur empirisme se sont trouvés en harmonie avec les lois naturelles.

RÉSUMÉ DE LA LEÇON VII.

Lorsque plusieurs systèmes d'ondes émanant de centres d'agitation distincts se propagent dans l'eau ou dans l'air, le mouvement de chaque molécule est la somme des mouvements qui lui sont communiqués.

Dans le cas de l'eau, lorsque les crêtes ou reliefs d'un système d'ondes coïncident avec les crêtes d'un autre système, la superposition des deux systèmes a pour résultat une augmentation de hauteur des ondes. Mais lorsque les reliefs d'un système coïncident avec les creux de l'autre, les deux systèmes se détruisent totalement ou en partie.

Cette destruction mutuelle de deux systèmes d'ondes se nomme *interférence*.

Les mêmes remarques s'appliquent aux ondes sonores. Si, dans deux systèmes d'ondes sonores, la condensation coïncide avec la condensation, et la dilatation avec la dilatation, le son résultant de la superposition est plus fort que le son produit par chaque système en particulier. Mais, si les condensations d'un système coïncident avec les dilatations de l'autre système, il y a destruction partielle ou totale des deux systèmes.

Ainsi, lorsque deux tuyaux d'orgue de même ton, placés près l'un de l'autre sur le même réservoir d'air, sont mis en vibration, ils s'influencent tellement que, dans les instants où l'air entre dans l'embouchure de l'un des tuyaux, il sort de celle de l'autre. A ce moment, par conséquent, l'un des tuyaux produit une condensation, l'autre produit une dilatation. Les sons des deux tuyaux se détruisent mutuellement.

Lorsque deux sons musicaux, qui sont presque de même ton, vibrent en même temps, l'effluve continu de son est troublé par des battements.

Ces battements sont dus aux coïncidences et aux oppositions alternatives des deux systèmes d'ondes sonores. Si les deux sons ont la même intensité, leur coïncidence produit un son dont l'intensité est quadruple de celle de chacun des deux sons; tandis que leur interférence produit le silence absolu.

L'effet des deux sons combinés est donc une série de chocs, que nous avons appelés *battements*, séparés les uns des autres par des séries de pauses.

La rapidité avec laquelle les battements se succèdent est égale à la différence de vitesse entre les deux périodes de vibration des sons.

Lorsqu'on fait résonner une cloche ou un disque, les vibrations des deux côtés d'une même ligne nodale se neutralisent partiellement; lorsqu'un diapason résonne, les vibrations des deux branches se neutralisent aussi en partie. Dans ces divers cas, la suppression d'une partie des vibrations peut avoir pour effet d'augmenter l'intensité du son.

Lorsqu'un rayon lumineux, réfléchi sur un écran par deux diapasons produisant des battements, est influencé simultanément par les deux systèmes de vibration, l'intermittence du son est indiquée par les allongements et les raccourcissements de la bande lumineuse sur l'écran.

La loi de la superposition des vibrations ci-dessus énoncée n'est strictement vraie que dans le cas où les amplitudes sont extrêmement petites. Lorsque l'agitation de l'air par un seul corps sonore est assez violente pour que la loi cesse d'être applicable, il se forme des ondes secondaires qui correspondent aux sons harmoniques du corps sonore.

Lorsque, par leur intensité, deux tons dépassent la limite de la loi de superposition, leurs ondes secondaires se combinent pour produire des sons *résultants*.

Les sons résultants sont de deux sortes: les uns correspondent à des vitesses de vibration égales à la différence des vitesses des deux sons primitifs; les autres correspondent à des vitesses de vibration égales à la somme des vitesses des deux sons primitifs. Les premiers sont nommés *tons par différence*, et les seconds *tons par sommation*.

LEÇON VIII.

Combinaison des sons musicaux. — Plus sont petits les deux nombres qui expriment le rapport de leurs périodes de vibrations, plus l'harmonie des deux sons est grande. — Idées des pythagoriciens relativement à la consonnance musicale. — Théorie d'Euler sur la consonnance. — Analyse physique de la question. — Théorie de Helmholtz. — Dissonnance due aux battements. — Interférence des sons fondamentaux et des sons harmoniques. — Représentation graphique de la consonnance et de la dissonnance. — Cordes musicales. — Échelle diatonique. — Démonstration optique des intervalles musicaux. — Figures de M. Lissajous. — Vibrations sympathiques. — Mécanisme de l'organe de l'ouïe. — Les soies de M. Schultz. — Les otolites. — Les fibres de Corti. — Conclusion.

Le sujet de notre leçon d'aujourd'hui présente deux faces, l'une physique, l'autre esthétique. Nous avons à étudier la question de la consonnance musicale ; à examiner les sons musicaux dans les combinaisons définies qu'ils peuvent former l'un avec l'autre ; à découvrir la raison pour laquelle certaines combinaisons sont agréables, et d'autres désagréables à l'oreille.

Voici deux diapasons montés sur leurs caisses résonnantes. Je les excite successivement à l'aide d'un archet. Ils résonnent ensemble, et leurs notes unies font sur nos oreilles l'effet de la note émise par un seul diapason. Chacun d'eux exécute 256 vibrations par seconde. Les deux sons musicaux coulent ensemble en un flot d'unisson parfait, lorsque le rapport de leurs nombres de vibration est celui de 1 à 1.

Voici deux autres diapasons que nous excitons de même par un coup d'archet. Leurs notes se fondent aussi l'une dans l'autre agréablement et harmonieusement. Nous avons déterminé déjà leurs vitesses de vibration avec la sirène, et trouvé que le plus grand fait 256 vibrations par seconde, le plus petit 512. En conséquence, pour chaque onde sonore simple émise par le premier, il y a deux ondes émises par le second. Il n'est pas nécessaire que je dise aux musiciens de mon auditoire que la combinaison de sons qu'ils entendent est celle d'un son fondamental avec son octave, et que je leur apprenne qu'après l'unisson parfait, ces deux notes, dont les nombres de vibrations sont dans le rapport de 1 à 2, se fondent l'une dans l'autre avec la plus agréable harmonie.

Faisons vibrer encore ensemble ces deux autres diapasons. La combinaison des deux sons flatte agréablement l'oreille, mais la consonnance n'est pas aussi absolument parfaite que dans le cas précédent. On a la sensation, quoiqu'à peine accusée, d'une certaine rudesse qui n'existait pas dans la fusion d'une note avec son octave. Cette espèce de rudesse peut cependant être considérée comme insignifiante ; elle n'empêche pas que la combinaison des deux sons plaise vraiment à l'oreille. Les deux nombres gravés sur ces deux diapasons apprennent qu'ils exécutent l'un 256, l'autre 384 vibrations par seconde. Ces nombres sont entre eux dans le rapport de 2 : 3 ; le second fait donc trois vibrations sonores pendant que le premier en fait deux. Les musiciens de mon auditoire en concluront que les deux notes sont séparées l'une de l'autre par l'intervalle appelé *quinte*. Après l'octave, c'est la combinaison qui charme le plus l'oreille.

Je change une fois encore les diapasons ; en voici deux qui résonnent simultanément en même temps. La combinaison est toujours agréable, moins cependant que la précédente. La rudesse qui commençait à se faire sentir est ici un peu plus prononcée. Un des diapasons fait 384 vibrations par seconde, et l'autre 512. Ces deux nombres sont dans le rapport de 3 : 4. Les musiciens ont donné à cet intervalle le nom de *quarte*.

Ainsi les rapports des nombres de vibrations sont : entre deux sons à l'unisson parfait 1 : 1 ; entre une note et son octave 1 : 2 ; entre une note et sa quinte 2 : 3 ; enfin entre une note et sa quarte 3 : 4. Nous voyons ainsi se développer graduellement cette loi remarquable, que *la combinaison de deux notes est d'autant plus agréable à l'oreille, que le rapport de leurs vitesses de vibration est exprimé par des nombres plus simples*. Passons à deux diapasons dont les vitesses de vibration sont comme 4 : 5, ou qui sont séparées par l'intervalle d'une *tierce majeure;* l'harmonie est moins parfaite que dans chacun des cas déjà examinés. Avec le rapport de 5 : 6, ou d'une tierce mineure, elle est en général encore moins parfaite, et voici que nous approchons de la limite au-delà de laquelle une oreille musicale ne tolère plus la combinaison de deux sons. Si nous prenions, par exemple, deux diapasons dont les vitesses de vibration fussent dans le rapport de 13 à 14, vous n'hésiteriez pas à déclarer que leur combinaison est tout à fait discordante. Il ne faut pas s'imaginer que le choix des combinaisons harmoniques ait été déterminé d'après des principes scientifiques. On les a choisies empiriquement, en raison du plaisir qu'elles causaient, longtemps avant qu'on sût quoi que ce soit de leur simplicité numérique.

Pythagore a fait le premier pas dans la recherche de l'interprétation physique de ces intervalles musicaux. Ce grand philosophe tendit une corde, et la divisa en trois parties égales. Il rendit parfaitement fixe un des points de division, de manière à former deux segments indépendants, et dont les longueurs étaient doubles l'une de l'autre. Il fit vibrer simultanément ces deux segments, et il trouva que la note émise par le plus court était l'octave de la note émise par le plus long. Il divisa ensuite la corde en deux parties, dont le rapport était celui de 2 : 3, et trouva que les notes étaient séparées par l'intervalle d'une quinte. En continuant à diviser ainsi sa corde en ses parties aliquotes, Pythagore constata que les intervalles harmonieux en musique, ceux que nous appelons accords consonnants, correspondaient à certaines divisions de la corde; et il fit cette découverte, d'une importance capitale, que plus le rapport numérique des deux parties de la corde était simple, plus l'accord des deux sons était parfait. Il n'alla pas plus loin, il restait aux investigateurs des siècles à venir à nous révéler la raison intime de ces accords, et que les longueurs des cordes sont dans un rapport simple avec les nombres de leurs vibrations. Comment la simplicité devient-elle ici une source de plaisir, cette question resta longtemps une énigme, car à peine peut-on citer la prétendue solution qui en fut donnée par Euler, et qui revenait à dire qu'il est dans la nature de l'âme humaine d'aimer les calculs simples.

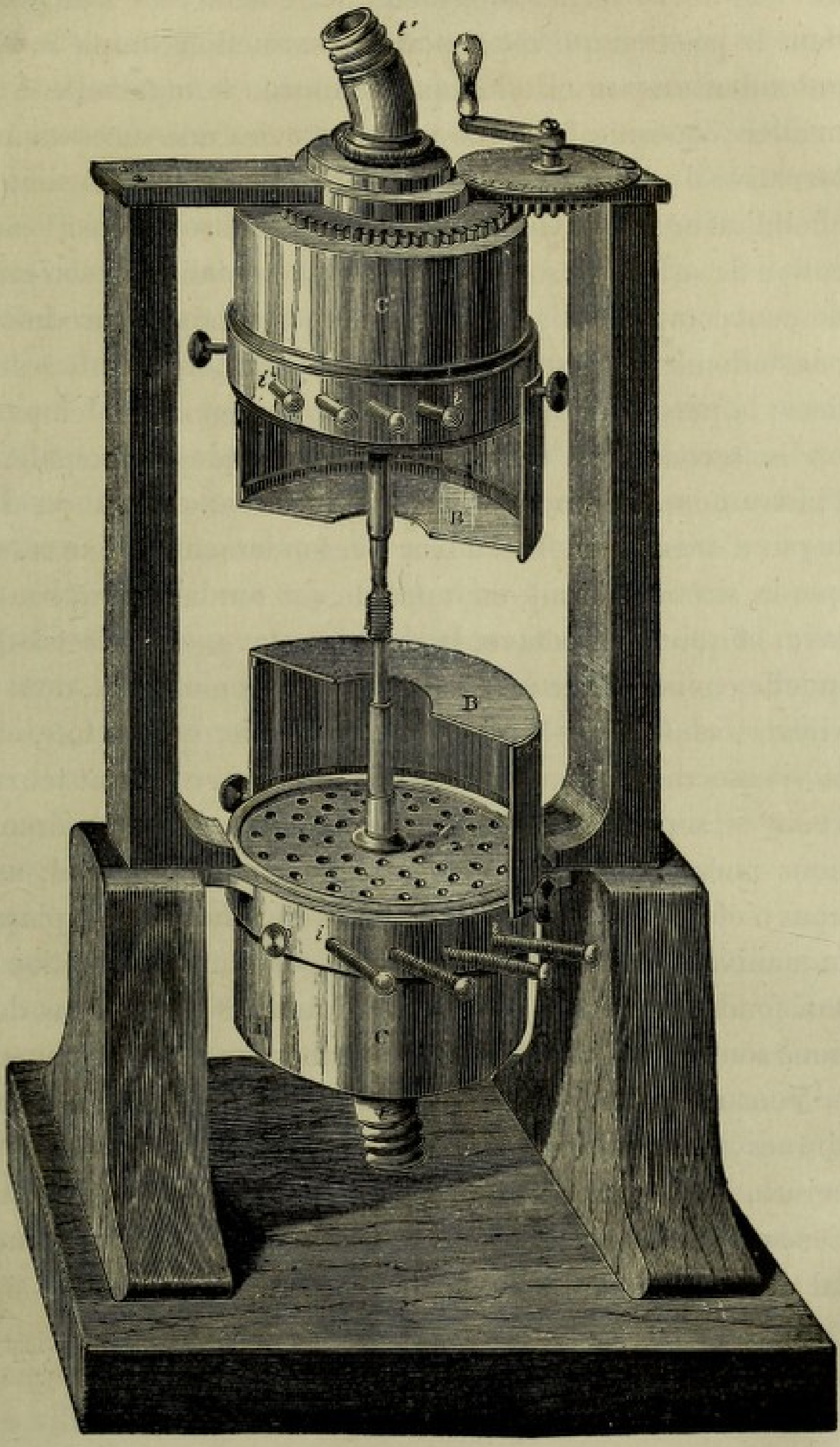
La double sirène, dont nous reproduisons la figure (*fig.* 145), nous permet d'obtenir toutes ces combinaisons et beaucoup d'autres. Cet instrument possède entre tous l'avantage de nous faire connaître immédiatement le rapport des vitesses de vibration des deux notes, d'après les nombres de trous des disques qui les font naître par leur rotation. Nous n'avons donc pas besoin de nous en rapporter à des résultats obtenus avec des diapasons réglés sur l'étalon de Paris ; nous avons sous la main le moyen d'arriver à la certitude absolue pour tout ce qui touche à la combinaison des sons musicaux. Mais avant de procéder à l'étude de ces combinaisons, étudions l'action de la double sirène d'une manière un peu plus complète que nous l'avons jugé nécessaire jusqu'ici.

Ainsi que vous le savez, l'instrument consiste dans la réunion de deux sirènes de Doves C et C′, sur un axe commun, la sirène supérieure C′ étant placée sens-dessus-dessous ou renversée. Chaque sirène a quatre séries de trous, dont les nombres sont :

	Sirène supérieure. Nombre de trous.	Sirène inférieure. Nombre de trous.
1re série	10	18
2e série	15	12
3e série	12	10
4e série	9	8

On remarquera que le nombre 12 est commun aux deux sirènes. J'ouvre les deux séries de 12 trous, et j'envoie le courant d'air dans l'instrument. Les deux sons coulent ensemble dans un unisson parfait, et l'unisson se conserve, quelle que soit l'élévation toujours croissante du ton du son. Vous avez vu dans la seconde leçon qu'en tournant la manivelle de la sirène supérieure, on peut à volonté faire que les orifices de la chambre à air C′ rencontrent ou ne rencontrent pas ceux du disque tournant, et que l'on peut ainsi élever ou abaisser, entre des limites assez resserrées mais suffisantes, le ton de la note émise par la sirène supérieure. Ce changement de ton s'annonce à l'instant même par des battements. Plus la manivelle tourne vite, plus le ton de la sirène supérieure s'élève au-dessus de celui de la sirène inférieure, ou s'abaisse au-dessous, et par conséquent plus les battements sont rapides. Cela posé, il existe entre la rotation de la manivelle et celle de la chambre à air C′ une liaison telle que, lorsque la manivelle tourne d'un demi-angle droit, le réservoir d'air tourne d'un sixième d'angle droit, ou d'un vingt-quatrième de la circonférence entière. Or, dans le cas actuel, où la circonférence est percée de 12 orifices, la rotation d'un vingt-quatrième de circonférence fait que les orifices du réservoir supérieur sont fermés quand ceux du réservoir inférieur sont ouverts, et *vice versa*. Il est évident par là même que les intervalles des pulsations d'air de la sirène inférieure, correspondant à la dilatation de ses ondes sonores, coïncident avec les pulsations d'air correspondant aux condensations de la sirène supérieure. De fait donc, les condensations de l'une des sirènes coïncident avec les dilatations de l'autre, et il doit en

Fig. 145.



résulter une extinction complète des sons des deux sirènes.

Peut-être vous semble-t-il que mes paroles vont un peu au-delà de la vérité, car, bien que la manivelle soit placée dans la position qui correspond à l'extinction complète, vous entendez un son. Et lorsque je tourne la manivelle d'une manière continue, bien que vous perceviez une succession alternative de renforcements et d'affaiblissements du son, les affaiblissements sont loin d'être un silence absolu. Voici l'explication de ce fait : le son de la sirène est en réalité un son grandement composé. Ses chocs violents et soudains ne produisent pas seulement les sons correspondant aux nombres de ses orifices ; la perturbation aérienne fait naître en même temps des ondes secondaires, qui s'associent aux ondes principales de l'instrument, comme les harmoniques d'une corde ou d'un tuyau d'orgue se mêlent à leur son fondamental. Il en résulte que la sirène produit, en outre du son fondamental, son octave, la quinte à l'octave, la double octave, etc. ; c'est-à-dire qu'elle communique à l'air des vibrations multiples, dont les vitesses sont égales à deux fois, trois fois, quatre fois, etc., la vitesse du son fondamental. Cela posé, en faisant tourner la sirène supérieure d'un vingt-quatrième de circonférence, nous anéantissons complétement le son fondamental, mais nous n'éteignons pas son octave [1]. Il en résulte qu'en plaçant la manivelle dans la position correspondant à l'extinction du son fondamental, au lieu de produire le silence, nous donnons son plein essor au premier harmonique de l'instrument.

Vous remarquerez que M. Helmholtz a entouré ses deux sirènes, supérieure et inférieure, de boîtes circulaires en cuivre, B, B', dont la figure ne représente que les moitiés. Ces boîtes renforcent par leur résonnance le son fondamental de l'instrument, et nous permettent de suivre ses varia-

[1] Ni même aucun des sons harmoniques dont les vitesses de vibrations sont des multiples *pairs* de la vitesse du son fondamental.

tions beaucoup plus facilement que s'il n'était pas renforcé. Il faut une certaine rapidité de rotation pour que les boîtes atteignent leur maximum de résonnance; mais lorsque cette vitesse est acquise, le son fondamental prend une intensité considérable, et si alors on fait tourner la manivelle, les battements se succèdent avec une puissance extraordinaire.

Mais toujours, comme nous l'avons dit, les pauses entre les battements du son fondamental ne sont pas des intervalles de silence absolu; ils sont remplis par le son de l'octave supérieure, et cet inconvénient oblige à prendre des précautions lorsqu'on fait servir l'instrument à la détermination des vitesses de vibration. Désirant un jour savoir combien de fois une petite flamme chantante s'éteignait et se rallumait dans une seconde, je plaçai une sirène à quelque distance de la flamme; je fis résonner l'instrument, et après un temps assez court je m'aperçus que la flamme dansait synchroniquement avec les battements accusés par l'oreille. Je crus pouvoir en conclure que l'unisson était à peu près atteint, et dans cette supposition je fis le calcul de la vitesse de vibration. J'obtins un nombre extraordinairement faible, la moitié de celui que je devais obtenir. Et quelle était la cause de mon erreur? Simplement celle-ci : je croyais avoir affaire au son fondamental de la sirène, et c'était l'octave supérieure qui était en jeu. Cette octave et le son de la flamme produisaient des battements par leur coexistence; par là même le compteur de la sirène, qui enregistrait la vitesse réelle du son fondamental, et non de son octave, donnait un nombre trop faible de moitié. Pour corriger mon erreur, j'élevai le son fondamental lui-même à l'unisson du son rendu par la flamme. Aux approches de l'unisson, les battements se firent entendre de nouveau, et les sauts de la flamme furent beaucoup plus énergiques que dans le cas de l'octave. Le compteur de l'instrument enregistra alors la vitesse exacte des vibrations de la flamme.

En réalité, les premiers sons émis par la sirène sont toujours des sons harmoniques. Leurs vibrations arrivent à la continuité sonore avant le son fondamental, et coulent sous forme de sons musicaux agréables, tandis que le son fondamental est toujours à l'état de pulsations intermittentes. Mais l'instrument est si délicatement construit, que l'on atteint bientôt la vitesse de rotation qui fait dominer le son fondamental sur les sons accessoires qui l'accompagnent; et si alors on rend le courant d'air plus faible, de manière à ralentir la vitesse de rotation, c'est aux dépens de l'intensité des sons harmoniques. Il était donc grandement désirable, pour faciliter l'étude des sons harmoniques, de trouver un moyen d'allier une rotation lente avec un souffle très-fort.

Dans ce but, M. Helmholtz chargea un ressort de presser légèrement contre le disque de la sirène, et en augmentant ainsi par degrès plus lents la vitesse de rotation, il put constater la prédominance initiale des sons harmoniques et le triomphe final du son fondamental. Ne voulant pas cependant s'en rapporter à l'observation directe du ton, il détermina le son fondamental par le nombre des battements correspondant à une révolution de la manivelle de la sirène supérieure. En supposant 12 orifices ouverts dans chacune des deux sirènes supérieure et inférieure, une rotation de la manivelle égale à 45 degrés produit l'interférence et l'extinction du son fondamental. Les coïncidences des deux sons fondamentaux ont lieu à la fin de chaque rotation de 90 degrés. Donc, pour le son fondamental, il doit y avoir quatre battements dans chaque intervalle de 360 degrés, ou dans chaque révolution complète de la manivelle. Or, M. Helmholtz, avec les dispositions que je viens d'indiquer, trouva que les premiers battements qu'il entendait étaient au nombre de 12, et non pas de 4 pour chaque révolution de la manivelle. Ces battements étaient donc ceux des seconds harmoniques, dont la vitesse de vibration est trois fois celle du son fondamental. Ils se continuaient aussi longtemps que le nombre des pulsations d'air ne dépassait pas 30 ou 40 par seconde. Dans cet intervalle le second harmonique était comparativement si puissant que ses battements se faisaient entendre à l'exclusion de tous les autres. Entre 40 et 80 bouffées d'air, le nombre des battements tomba de 12 à 8 par chaque révolution de la manivelle. Dans ce second intervalle, c'était de nouveau le premier harmonique, ou l'octave du son fondamental, qui prédominait, et dont on entendait les battements. Ce ne fut que lorsque la vitesse des pulsations dépassa la limite de 80 par seconde, que le nombre des battements descendit à 4 par révolution. En d'autres termes, ce n'est que lorsque la vitesse de rotation est supérieure à cette limite, que le son fondamental accuse sa prédominance sur ses compagnons.

L'instrument que vous avez sous les yeux est construit de telle sorte que, avec une vitesse convenable de rotation, le son fondamental est à la fois moelleux et puissant. Arrivons maintenant à combiner les tons dans un ordre déterminé, en même temps que les oreilles exercées de cet auditoire apprécieront leurs rapports musicaux. Vous avez déjà entendu le flot d'unisson parfait que font couler les deux séries ouvertes de 12 trous. Ouvrons maintenant dans la sirène supérieure la série de 8 trous, et la série de 16 trous dans la sirène inférieure. Toute oreille musicale, comme nous l'avons déjà remarqué, reconnaît l'intervalle d'une octave. Ouvrons en haut la série de 9 trous, en bas la série de 18 trous. L'intervalle est encore celui de l'octave. Cela prouve que l'intervalle n'est pas troublé quand on fait varier les *vitesses absolues* de vibration, aussi longtemps que leur rapport reste le même. La vérité de ce principe devient plus saillante si, après avoir commencé par une rotation très-lente, on amène rapidement la sirène à émettre ses sons les plus aigus. Aussi longtemps que les nombres d'orifices ouverts sont dans le rapport de 1 : 2, l'intervalle reste constamment celui d'une octave. Ouvrons maintenant une série de 10 trous en haut, une série de 15 en bas ; le rapport est ici celui de 2 : 3, et tous les musiciens qui l'entendent reconnaissent que l'intervalle est celui d'une quinte. Si j'ouvre une série de 12 trous en haut, et une de 18 en bas, je ne change pas l'intervalle. En ouvrant deux séries, l'une de 9, l'autre de 12, ou l'une de 12 et l'autre de 16 trous, nous obtenons l'intervalle appelé quarte, et le rapport des deux sons est de 3 : 4. De même, deux séries de 8 et de 10, ou de 12 et de 15, nous donnent l'intervalle d'une tierce majeure, le rapport des deux sons étant 4 : 5. Enfin, deux séries de 10 et de 12, ou de 15 et 18, donnent l'intervalle d'une tierce mineure, correspondant au rapport 5 : 6.

Ces expériences mettentamplement en évidence deux choses : la première, qu'un intervalle musical est déterminé, non par les nombres absolus de vibrations des deux notes combinées, mais par le rapport entre leurs nombres de vibrations ; la seconde, et je fais en ceci appel avec confiance à toutesles oreilles musicales qui ont écouté attentivement ces combinaisons, que plus les nombres qui expriment le rapport des vitesses de vibrations sont simples ou petits, plus la consonnance des deux sons est parfaite. La consonnance la plus parfaite est l'unisson 1 : 1 ; viennent ensuite successivement : l'octave 1 : 2 ; la quinte 3 : 3 ; la quarte 3 : 4 ; la tierce majeure 4 : 5 ; et enfin la tierce mineure 5 : 6. Nous pourrions aussi ouvrir deux séries, l'une de 8, l'autre de 9 trous ; cet intervalle répond à ce qu'on appelle en musique un *ton*. C'est une combinaison dissonante. Nous pourrions enfin ouvrir les deux séries de 15 et de 16 trous. C'est l'intervalle d'un *demi-ton ;* c'est encore une dissonance dure et désagréable.

D'où viennent ces sensations diverses ? Pourquoi le rapport le plus simple exprime-t-il la consonnance la plus parfaite? Les tentatives faites pour répondre à cette question ont été de deux ordres, métaphysiques et physiques. Les Pythagoriciens trouvèrent très-commode de répondre que *tout est nombre et harmonie*. Ils crurent aussi que les rapports numériques des sept notes de l'échelle musicale exprimaient en même temps les distances des planètes à ce qu'ils appelaient le *feu central ;* de là une prétendue danse en chœur des mondes, la *musique des sphères célestes*, que Pythagore avait seul, parmi les mortels, le privilége d'entendre, d'après le témoignage de ses disciples. Ne pourrions-nous, en passant, faire remarquer le contraste de cette glorieuse et poétique superstition de Pythagore avec celle que la fantaisie humaine a voulu mettre en vogue de nos jours? Si les caractères que prennent les superstitions dans les différents âges étaient l'indice de la marche progressive ou rétrograde de l'esprit humain, assurément le XIX^e^ siècle n'aurait pas lieu de s'enorgueillir dans sa comparaison avec le VI^e^ siècle avant l'ère chrétienne. Un essai plus sérieux d'explication, dans l'ordre métaphysique, de la relation intime entre la consonnance et les rapports les plus simples, fut tenté par le célèbre mathématicien Euler, et son explication, si tant est qu'on puisse lui donner ce nom, fit taire longtemps les chercheurs, sans toutefois les satisfaire pleinement. Euler analyse la cause du plaisir. Nous nous délectons, dit-il, dans l'*ordre;* il nous est agréable d'observer les *moyens qui concourent à une fin.* Mais il faut que les efforts que nous faisons pour discerner l'ordre ne soient pas assez grands pour nous fatiguer. Si les relations qu'il s'agit de démêler sont trop complexes, elles ne nous réjouissent pas, quoique nous y retrouvions l'ordre. Plus sont simples les termes par lesquels l'ordre s'exprime, plus notre plaisir est grand. De là la supériorité, en musique, des rapports simples sur les rapports composés. La consonnance, suivant Euler, est le plaisir spirituel résultant de la perception de l'ordre sans fatigue de l'esprit.

Mais on ne remarquait pas, dans cette théorie, que Pythagore lui-même, qui a fait les premières expériences sur les intervalles musicaux, ne savait absolument rien des vitesses ou des périodes de vibrations. On oubliait que la grande majorité des personnes qui aiment la musique, et dont les oreilles sont les plus habiles à découvrir les plus légères dissonances, sont toutes dans la condition de Pythagore, ne sachant rien des périodes ou des rapports des vibrations. On pourrait même ajouter que les hommes les plus savants dans ces matières ne sont nullement influencés dans le plaisir qu'une consonnance leur fait par leur savoir en acoustique. L'explication d'Euler ne satisfait donc pas l'esprit, et il était réservé à un illustre Allemand contemporain d'assigner à la consonnance et à la dissonance, après avoir fait une très-profonde analyse de la question, une cause physique tellement simple et tellement satisfaisante, que quand elle a été clairement établie, on est tout surpris qu'on ait été si longtemps à la découvrir.

Diverses expressions dont nous nous sommes servi dans les précédentes leçons peuvent déjà vous faire pressentir la véritable explication de la consonnance et de la dissonance, formulée par M. Helmholtz. Permettez-moi de répéter ici une expérience, qui suffirait presque à elle seule pour imposer cette explication à votre attention. Voici deux jets de gaz enflammés que je puis transformer en flammes chantantes, simplement en les enfermant dans deux tubes. Les tubes sont de même longueur, et les flammes chantent maintenant à l'unisson. A l'aide de ce curseur mobile, j'augmente un peu la longueur de l'un des tubes. Il en résulte des battements bien tranchés, qui se succèdent assez lentement pour que vous puissiez facilement les compter. J'augmente un peu plus la longueur du tube. Les battements sont plus rapides, à peine pourriez-vous les compter. Et maintenant, je prie instamment les musiciens de mon auditoire de me suivre avec attention pendant que j'accroîtrai graduellement la vitesse de succession des battements. Il est parfaitement évident que le roulement que vous entendez diffère seulement par la rapidité de la succession des battements lents que vous entendiez tout à l'heure. Il n'y a plus cette fois de rupture de continuité des battements. Nous commençons lentement, nous augmentons graduellement la vitesse; la succession est maintenant assez rapide pour produire cette sensation particulière et désagréable, que tout musicien qui l'entend appelle dissonance. Je vais faire l'expérience inverse, et passer graduellement des battements rapides aux battements lents. Je raccourcis peu à peu le tube que tout à l'heure j'allongeais. Vous constatez dans les phénomènes la même continuité. Les battements se séparent de plus en plus et par degrés les uns des autres, jusqu'à ce qu'ils soient finalement assez lents pour pouvoir être comptés. Voici donc que les flammes chantantes nous permettent de suivre les battements avec certitude, jusqu'à ce qu'ils cessent d'être des battements, et qu'ils se convertissent en dissonance.

Cette expérience prouve invinciblement qu'*on peut* produire la dissonance par une succession rapide de battements, et j'imagine que cette cause de dissonance aurait été découverte beaucoup plus tôt, si les esprits n'avaient pas été jetés hors de la voie véritable par la théorie des *sons résultants*, énoncée par Thomas Young. Young imagina que, lorsqu'ils étaient assez rapides, les battements se fondaient ensemble pour former un son résultant. Il voulait que la fusion des battements les uns avec les autres fût l'analogue nécessaire de la fusion des pulsations en un son musical; et il était confirmé dans cette opinion par le fait déjà discuté, que le premier ton de différence, c'est-à-dire le plus grave des sons résultants, correspond, comme les battements, à une période de vibration égale à la différence entre les périodes des deux sons primitifs. Mais, en réalité, l'effet des battements sur l'oreille est tout à fait différent de l'effet des pulsations successives d'un son musical ordinaire. Dans notre dernière leçon, j'ai fait entendre un son résultant né de 33 vibrations par seconde. Ce son était parfaitement moelleux et musical, tandis que les battements qui se succèdent avec une vitesse de 33 par seconde sont déclarés, par l'oreille exercée de M. Helmholtz, être dans les conditions de la dissonance la plus intolérable. Donc, le son résultant auquel nous faisons allusion ne pouvait pas être produit par la fusion des battements. Lorsqu'il y a moins de 33 battements par seconde, ils sont moins désagréables. Ils peuvent même devenir agréables en ce qu'ils imitent ou rappellent les trilles de la voix humaine. Avec une vitesse supérieure à celle de 33 par seconde, la rudesse diminue; mais elle se fait encore sentir quand le nombre des battements est de 100 par seconde. M. Helmholtz fixe à 132 par seconde la limite à laquelle l'effet de la dissonance disparaît. Nous voyons donc que la continuité et la douceur du son engendré par les ondes sonores ordinaires sont complètes pour des périodes de vibrations bien au-dessous de celles qui correspondent à la disparition des battements. Les pulsations des ondes sonores ordinaires se fondent graduellement et doucement ; dans les battements, au contraire, les passages du son au silence, du silence au son, sont brusques et durs, et font par conséquent subir à l'oreille cette série d'intermittences saccadées qui se traduit elle-même par la sensation de dissonance.

Cette théorie est-elle d'accord avec les faits constatés? Examinons d'abord nos diapasons, et cherchons à reconnaître si la manière dont ils se comportent est en harmonie avec cette théorie. Et qu'il me soit permis de faire remarquer que nous n'avons affaire ici qu'aux sons fondamentaux. On a pris les précautions nécessaires pour écarter l'intervention des sons harmoniques, ils retentissent assez faiblement pour qu'aucun son résultant ne puisse influencer d'une manière sensible les sons fondamentaux. Ayons bien présent à l'esprit que les battements et la dissonance s'évanouissent lorsque la différence des deux vitesses de vibration est 0 ; que la dissonance est à son maximum lorsque le nombre des battements est de 33 par seconde; qu'ensuite elle diminue graduellement, pour disparaître quand le nombre des battements s'élève à 132 par seconde. Analysons maintenant les sons de nos diapasons, en commençant par l'*octave*.

Ici les nombres de vibrations sont :

512 — 256 ; différence = 256.

Il est clair que, dans ce cas, il ne peut pas y avoir de battements puisque la différence est trop grande pour qu'ils puissent se produire.

Passons à la *quinte*. Les vitesses de vibrations sont :

384 — 256 ; différence = 128.

La différence est à peine au-dessous du nombre 132, qui fait évanouir les battements; la dureté ou dissonance doit donc être très-faible.

Prenons la *quarte ;* les nombres sont :

384 — 312; différence = 72.

Nous sommes en plein, cette fois, au-dessous des limites de disparition des battements ; la dureté ou dissonance sera donc sensible.

Prenons enfin la *tierce majeure ;* les nombres des vibrations sont :

320 — 256 ; différence = 64.

La différence est plus rapprochée encore du nombre 33, qui donne le maximum de dissonance ; la dureté est plus sensible.

Nous le voyons donc, la manière dont nos quatre diapasons se comportent est parfaitement d'accord avec l'explication qui attribue la dissonance aux battements.

Il importe de remarquer toutefois que si l'on veut éviter les battements dans les cas de l'octave et de la quinte, il faut que les intervalles soient *purs*, c'est-à-dire que pour chaque onde émise par le diapason fondamental il y ait exactement deux ondes émises par son octave; que de même, dans le cas de la quinte, pour deux ondes émises par un des diapasons, il y en ait trois émises par l'autre. Si, dans le cas de l'octave, je charge d'un petit morceau de cire l'un quelconque des deux diapasons, j'obtiens des battements distincts. Plaçant mon oreille près de la caisse résonnante du diapason fondamental, et tenant à quelque distance l'autre diapason avec sa caisse, j'entends les battements, et je les entends comme battements de la note fondamentale, l'octave ne faisant en apparence aucune impression sur mon oreille. Lorsque l'octave est pure, le rapport des deux notes à un moment quelconque continue d'être toujours leur rapport. Si, par exemple, la condensation de l'une des ondes plus courtes coïncide avec la condensation de l'une des ondes plus longues, les condensations continueront à coïncider aussi longtemps que le rapport des deux sons sera exactement 1 : 2. Mais pour peu qu'on s'écarte de ce rapport, même d'une petite quantité, quoique au début les condensations aient coïncidé, les phases finiront par être en opposition, comme dans les cas que nous avons pleinement étudiés dans notre dernière leçon; et cette série alternative de coïncidences et d'oppositions engendrera forcément des battements. Des remarques analogues s'appliquent à des intervalles autres que l'octave.

Nous nous sommes astreints à ne mettre en jeu, dans chaque cas, qu'une couple de deux sons simples; mais M. Helmholtz a montré le rôle important que jouent les sons harmoniques et les sons résultants dans la question de consonnance musicale. Dans les diapasons avec lesquels nous avons expérimenté, j'avais écarté avec soin ces deux classes de sons, parce que je voulais que mon premier exemple fût aussi simple et facile que possible. Les sources de sons musicaux autres que les diapasons ne nous fourniraient pas ces tons simples. Les cordes du violon, par exemple, sont riches en sons harmoniques, dont les interférences doivent entrer en ligne de compte quand il s'agit de porter un jugement sur la combinaison des sons de deux cordes. Et, remarquons-le, les sons harmoniques sont un caractère indispensable des sons musicaux. Les sons absolument purs seraient pour l'oreille ce que l'eau pure est au palais, plate et insipide. Les sons, par exemple, des longs tuyaux d'orgues fermés sont presque parfaitement purs, car la tendance à la subdivision est si faible dans ces tuyaux que leurs harmoniques peuvent à peine se montrer. Or, les sons de ces tuyaux, quoique moelleux, nous fatigueraient bientôt; ils manquent de force et de caractère, ils ne satisfont pas aux exigences de notre oreille, qui veut de l'éclat et de l'énergie. En réalité, un bon son musical exige la présence de plusieurs des premiers harmoniques. La nécessité de ces derniers tons est tellement sentie, qu'on a soin généralement d'associer aux grands tuyaux d'orgues des tuyaux plus courts, qui rendent les sons harmoniques des grands tuyaux. De cette manière, là où le corps vibrant est incapable de fournir les harmoniques, ils sont suppléés par une source étrangère.

Examinons maintenant comment l'action des sons harmoniques s'accorde avec notre précédente théorie de la consonnance et de la dissonance. Prenons comme exemple l'octave qui comprend le *la* moyen du piano. Cette note correspond à 440 vibrations par seconde; l'*ut* au-dessous à 264; l'*ut* au-dessus à 528. Nommons le premier ut_3, et le second ut_4, et, fixant notre attention sur l'octave de ut_3 à ut_4, plaçons-nous carrément en présence à la fois des sons fondamentaux et des sons harmoniques des divers intervalles de cette octave, y compris tous les harmoniques jusqu'au neuvième. Nous remarquerons d'abord, relativement à cette octave, que ses deux sons fondamentaux ut_3 et ut_4 et leurs harmoniques répondent respectivement aux vitesses de vibrations suivantes :

		1	:	2	
Son fondamental		264		528	Son fondamental
Harmoniques	1.	528		1056	Harmoniques
	2.	792		1084	
	3.	1056		2112	
	4.	1320		2640	
	5.	1584		3168	
	6.	1848		3696	
	7.	2112		4224	
	8.	2376		4752	
	9.	2640		5280	

En comparant ces sons deux à deux ou par couples, il est impossible d'en trouver deux, dans l'une ou l'autre série, dont la différence soit moindre que 264. Donc, puisque les battements cessent de se faire sentir comme dissonance dès que leur nombre atteint 132 par seconde, la combinaison prise en considération sera tout à fait exempte de dissonance. Cette octave, par conséquent, est une consonnance absolument parfaite.

Prenons maintenant l'intervalle d'une quinte. Nous aurons pour les sons fondamentaux et les harmoniques :

		2	:	3	
Son fondamental		264		396	Son fondamental
Harmoniques	1.	528		792	Harmoniques
	2.	792		1188	
	3.	1056		1584	
	4.	1320		1980	
	5.	1584		2376	
	6.	1848		2772	
	7.	2112		3168	
	8.	2376		3564	
	9.	2640		3960	

La plus petite différence est ici de 132, qui correspond précisément au point où la dissonance disparaît. L'intervalle d'une quinte dans cette octave est donc aussi exempt de toute dissonance.

Prenons l'intervalle d'une quarte. Nous avons :

		3	:	4	
Son fondamental		264		352	Son fondamental
Harmoniques	1.	528		794	Harmoniques
	2.	792		1050	
	3.	1056		1408	
	4.	1320		1760	
	5.	1584		2112	
	6.	1848		2464	
	7.	2112		2816	
	8.	2376		3168	
	9.	2640		3520	

Nous avons cette fois une série de différences égales à 88, mais aucune n'est plus petite. Ce nombre, quoique inférieur à la limite à laquelle les battements cessent, est néanmoins assez élevé pour que leur effet de dureté soit très-peu sensible. Somme toute, cet intervalle ne vaut pas le précédent.

Passons à la tierce majeure. Nous avons :

		4	:	5	
Son fondamental		264		330	Son fondamental
Harmoniques	1.	528		660	Harmoniques
	2.	793		990	
	3.	1056		1320	
	4.	1320		1650	
	5.	1584		1980	
	6.	1848		2310	
	7.	2112		2640	
	8.	2376		2970	
	9.	2640		3300	

Plusieurs différences sont égales ici à 66. Les battements se rapprochent plus du maximum de dissonance que dans le dernier cas, et l'intervalle, par conséquent, est moins parfait encore au point de vue de la consonnance.

Enfin, la tierce mineure nous donne :

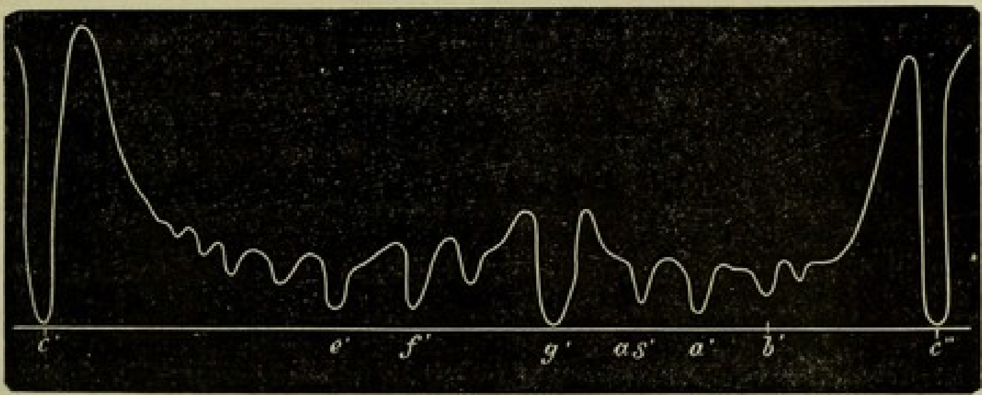
		5	:	6	
Son fondamental		264		316, 8	Son fondamental
Harmoniques	1.	528		633, 6	Harmoniques
	2.	792		950, 4	
	3.	1056		1267, 2	
	4.	1320		1584, 0	
	5.	1584		1900, 8	
	6.	1848		2217, 6	
	7.	2112		2534, 4	
	8.	2376		2851, 2	
	9.	2640		3168, 0	

La différence entre plusieurs de ces sons est de 53 vibrations; elle implique un plus grand trouble de la consonnance par les battements que dans les cas de la quinte, de la quarte ou de la tierce majeure. La tierce mineure est donc, sous le rapport de la consonnance, inférieure à tous ces intervalles.

Nous constatons ainsi, qu'à mesure que les nombres qui expriment les rapports des vitesses de vibration deviennent plus grands, l'influence perturbatrice des battements envahit de plus en plus l'intervalle. Ce résultat, évidemment, est en harmonie parfaite avec l'explication qui attribue la dissonance aux battements.

M. Helmholtz a essayé de représenter ces résultats graphiquement, et j'emprunte à son ouvrage les deux figures 146 et 147. Il admet, ainsi que je l'ai déjà dit, que le maximum de dissonance correspond à 33 battements par seconde; et il cherche à représenter les différents degrés de dissonance par des lignes de différentes longueurs. La ligne horizontale $c' \, c''$ (ut_3, ut_4) (*fig.* 146) représente la série de l'échelle musicale que nous venons d'analyser, et la distance comprise entre cette droite et un point quelconque de la courbe tracée au-dessus est la mesure de la dissonance correspondant à ce point. On suppose que le ton s'élève d'une manière continue, et non par sauts. Admettons, par exemple, que deux violonistes partent ensemble de la même note ut_3, et que, tandis que l'un continue à faire résonner l'ut_3, l'autre, rac-

Fig. 146.

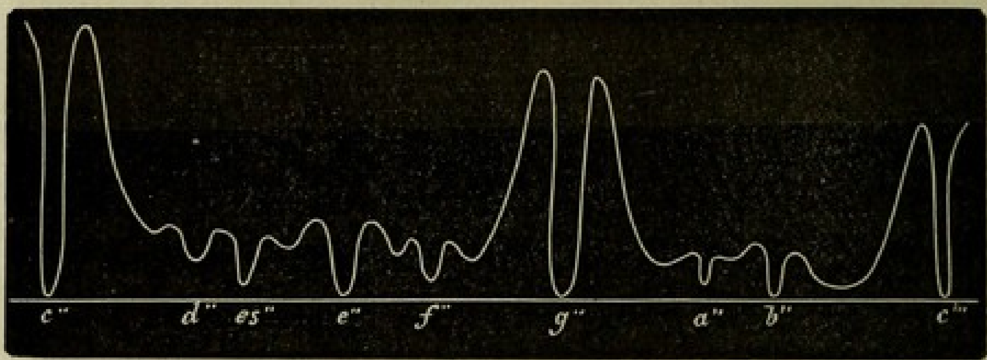


courcissant sa corde d'une manière graduelle et continue, produise un son de plus en plus élevé, jusqu'à ce qu'il atteigne l'ut_4, c''. L'effet produit sur l'oreille sera représenté par la courbe irrégulière de la figure 146.

Aussitôt après l'unisson représenté par le contact en c', la courbe s'élève subitement, indiquant que la dissonance est en ce point plus dure que partout ailleurs. En e' (mi_3), la courbe s'approche beaucoup de la droite c' c''; c'est le point correspondant à la tierce majeure. En f' (fa_3), la courbe approche encore davantage de la droite, et ce point correspond à la quarte. En g', la courbe touche presque la droite, et l'on conclut qu'en ce point qui correspond à la quinte, la dissonance est presque nulle. En a' (la_3), nous avons la sixième majeure; et enfin en c'' (ut_4), c'est-à-dire à l'octave, la dissonance s'évanouit. Les points *es'* et *as'* de la figure sont correspondants aux sons que les Allemands appellent la tierce plate et la sixième plate.

Lorsque la note fondamentale est ut_4, l'octave aiguë de ut_3, note prise pour notre point de départ, les divers degrés de consonnance et de dissonance sont indiqués par la figure 147. En supposant qu'on commence par l'unisson ut_4 — ut_4, et que l'un des violonistes élève par degrés et de plus en plus le son de sa corde, jusqu'à ce qu'il atteigne ut_5, l'octave aiguë de ut_4, la courbe représentera l'effet produit sur l'oreille. Nous voyons en outre par la comparaison des deux courbes que la dissonance est la règle générale; qu'elle s'évanouit seulement en certains points nettement définis, ou du moins devient assez faible pour que l'harmonie ne soit pas dé-

Fig. 117



truite. Ces points de dissonance minimum correspondent aux lieux où les nombres qui expriment le rapport des vitesses de vibration sont de petits nombres entiers. Nous devons rappeler que ces courbes ont été construites dans l'hypothèse que les battements sont la cause de la dissonance, et l'accord entre le calcul et l'expérience démontre suffisamment la vérité de l'hypothèse.

Vous m'avez ainsi suivi jusqu'aux dernières limites de la portion purement physique de l'acoustique, et il ne m'appartient pas de vous initier à la partie musicale. J'ajouterai seulement qu'en comparant trois ou un plus grand nombre de sons simultanés, c'est-à-dire qu'en les choisissant pour former un accord, nous prenons pour guide les principes que nous venons de poser. Nous choisissons toujours des sons en harmonie avec le son fondamental et les uns avec les autres. Si nous avions choisi une série harmonieuse de sons combinés deux à deux, la seule simplicité des rapports nous conduirait à faire tomber notre choix sur les sons exprimés par les nombres $1, \frac{5}{4}, \frac{4}{3}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, 2$; ces rapports étant les plus simples que nous trouvions dans l'étendue d'une octave. Mais lorsqu'on fait résonner successivement les notes représentées par ces rapports, on remarque que les intervalles entre 1 et $\frac{5}{4}, \frac{5}{3}$ et 2, sont plus grands que les autres, et exigent tous les deux l'intercalation de notes complémentaires. Les notes intercalées ont été choisies de manière à former des accords, non avec le son fondamental, mais avec le son $\frac{3}{2}$, pris pour son fondamental. Les rapports de ces deux sons avec le son fondamental sont $\frac{9}{8}$ et $\frac{15}{8}$. En les intercalant, nous avons les huit notes de l'échelle naturelle ou diatonique, exprimées par les noms et les rapports suivants :

Noms.	ut	ré	mi	fa	sol	la	si	ut
Intervalles.	1er	2e	3e	4e	5e	6e	7e	8e
Rapport des nombres de vibration.	1,	$\frac{9}{8}$,	$\frac{5}{4}$,	$\frac{4}{3}$,	$\frac{3}{2}$,	$\frac{5}{3}$,	$\frac{15}{8}$,	2.

Multipliant ces rapports par 24 pour éviter les fractions, nous obtenons la série suivante de nombres entiers, qui expriment les vitesses relatives de vibration correspondant aux notes de l'échelle diatonique :

24, 27, 30, 32, 36, 40, 45, 48.

La signification des termes tierce, quarte, quinte, etc., que nous avons si souvent appliqués aux intervalles musicaux, est maintenant évidente. Ces termes se rapportent à la position de la note dans l'échelle ou gamme.

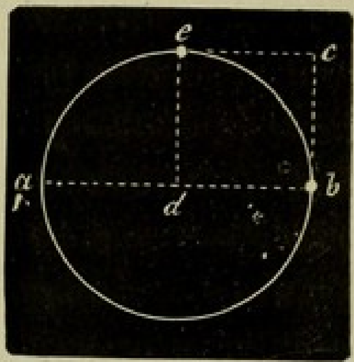
J'ai rappelé dans ma seconde leçon, et j'ai démontré par quelques expériences une méthode inventée par M. Lissajous pour l'étude des vibrations musicales. Au moyen d'un faisceau de lumière réfléchi par un miroir attaché à un diapason, nous avons vu le diapason écrire lui-même l'histoire de ses mouvements. Dans notre dernière leçon, nous avons eu recours à la même méthode pour montrer aux yeux les phénomènes des battements. Appliquons-la maintenant à l'étude de la composition des vibrations qui constituent les principaux intervalles de l'échelle diatonique. Et pour nous mieux préparer à l'intelligence entière de ce sujet délicat, commençons par un examen rapide des oscillations du pendule ordinaire.

En voici un sous vos yeux ; il consiste en un fil métallique, long de 10 mètres, solidement fixé à une plaque de fer au plafond de la salle, et chargé, à son extrémité, d'une boule de cuivre pesant 10 kilogrammes. J'écarte le pendule de sa position verticale, et je l'abandonne à lui-même. Il oscille, et ses oscillations s'accomplissent à peu près dans un même plan.

Je dis à peu près, parce qu'il est pratiquement impossible de suspendre un pendule de telle sorte que tout soit parfaitement symétrique autour du point de suspension. Il en résulte que le poids abandonne tôt ou tard la ligne droite, et décrit une ellipse plus ou moins allongée. Cette circonstance a présenté de sérieuses difficultés, il y a quelques années, aux physiciens qui ont voulu répéter la célèbre expérience par laquelle M. Foucault a mis en évidence la rotation de la terre.

Néanmoins, dans le cas actuel, la suspension du pendule a été faite avec tant de soin, que sa déviation de la ligne droite dans les premiers instants n'est pas perceptible. Supposons que l'amplitude de ses oscillations soit représentée par la ligne ponctuée *adb* (*fig.* 148). Le point *d*, milieu de cette ligne, est le point de repos. Lorsqu'il est écarté de ce point jusqu'en *b*, et abandonné à lui-même, il revient en *d*.

Fig 118.



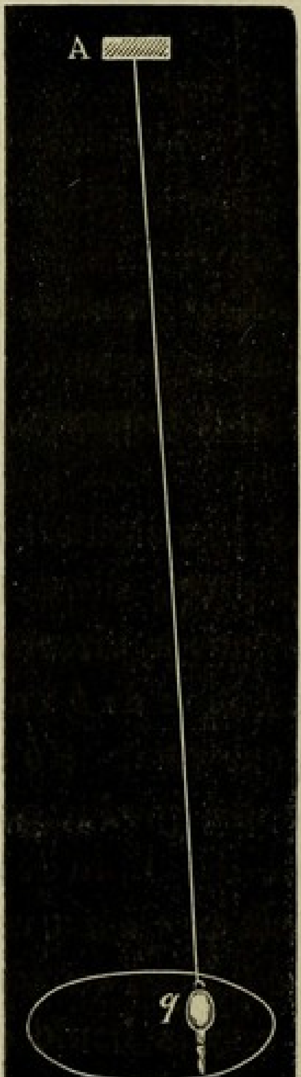
Puis, en vertu de sa vitesse acquise, il continue sa route et va en *a*. Là, il s'arrête un instant, et revient à *b* par *d*. Il continue ainsi à osciller, jusqu'à ce que son mouvement soit tout à fait éteint.

Lorsque le pendule a atteint la limite *b* de son oscillation, concevons qu'il reçoive une impulsion dans une direction perpendiculaire à la droite *ab*; c'est-à-dire dans la direction *bc*. En supposant que la durée d'une oscillation de *b* en *a* soit d'une seconde[1], le temps nécessaire pour venir de *b* en *d* sera d'une demi-seconde. Supposons en outre que l'impulsion donnée en *b* soit telle que si le pendule était libre de se mouvoir dans sa direction elle l'entraînerait en *c* dans une demi-seconde, la distance *bc* étant égale à *bd*. Dans ces conditions, on est amené à se demander où sera la boule du pendule au bout d'une demi-seconde? Il est parfaitement manifeste que les deux forces seront satisfaites ou auront produit tout leur effet, si, au bout d'une seconde, la boule se trouve transportée en *e*, en face du centre *d*. On démontre sans peine qu'il ne peut atteindre ce point *d* qu'en décrivant l'arc circulaire *bc*, et qu'après l'avoir atteint, il devra

1 Cette supposition est faite pour la simplicité du raisonnement; la durée réelle de l'oscillation d'un pendule long de 9 mètres est comprise entre 2 et 3 secondes.

continuer sa route sur la circonférence du cercle, de manière à revenir au point *b* après avoir passé par *a*. Une impulsion rectangulaire suffit donc à transformer l'oscillation en rotation, ou à faire décrire au pendule une circonférence de cercle, comme l'indique la figure 149.

Fig. 149.



Si la force appliquée en *b* suffisait à faire parcourir à la boule du pendule un espace plus grand que *bc* dans une demi-seconde, le pendule décrirait une ellipse, qui aurait pour petit axe la ligne *ab*. Si, au contraire, la force appliquée en *b* ne pouvait faire parcourir au pendule qu'une distance moindre que *bc*, sa boule décrirait une ellipse, dont *ab* serait le grand axe.

Examinons maintenant ce qui doit arriver lorsque l'impulsion rectangulaire est appliquée au moment même où le pendule passe par son point de repos, en *d*.

Supposons donc que le pendule se meuve de *a* en *b*, et que lorsqu'il arrive en *d*, il reçoive une impulsion capable de lui faire parcourir *dc* (*fig.* 150) en une demi-seconde. Ici, évidemment, le mouvement résultant sera dirigé suivant la ligne droite *dg*, située entre *dc* et *db*. Le pendule reviendra, le long de cette ligne, au point *d*, et il continuera sa course sur le prolongement de la même ligne jusqu'en *h*. Dans ce cas, par conséquent, le pendule décrira la droite *gh*, oblique à la direction primitive de ses oscillations.

Supposons qu'au moment où le pendule reçoit l'impulsion, la direction de son mouvement soit de *b* vers *a* au lieu d'être de a vers b, il est évident que la direction de la résultante sera une droite dg, oblique encore à la direction primitive des oscillations, mais dirigée comme l'indique la figure 151.

Lorsque l'impulsion est imprimée au pendule, non plus au milieu ou à la limite de son oscillation, mais en un point intermédiaire quelconque, il ne décrit ni une ligne droite, ni

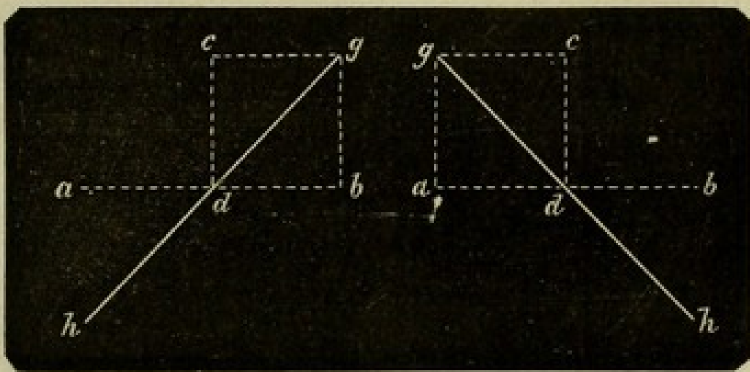


Fig. 150. Fig. 151.

un cercle, mais une courbe ayant quelque chose de la droite et du cercle. Cette courbe est en effet une ellipse plus ou moins allongée, dont les axes sont obliques à la droite ab, le long de laquelle s'effectuaient primitivement les oscillations. Si, par exemple, l'impulsion est appliquée en un point d' (*fig.* 152), lorsque le pendule marchait *vers* le point b, la

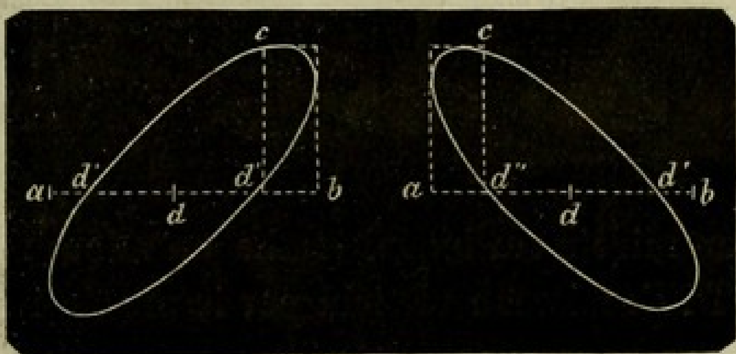
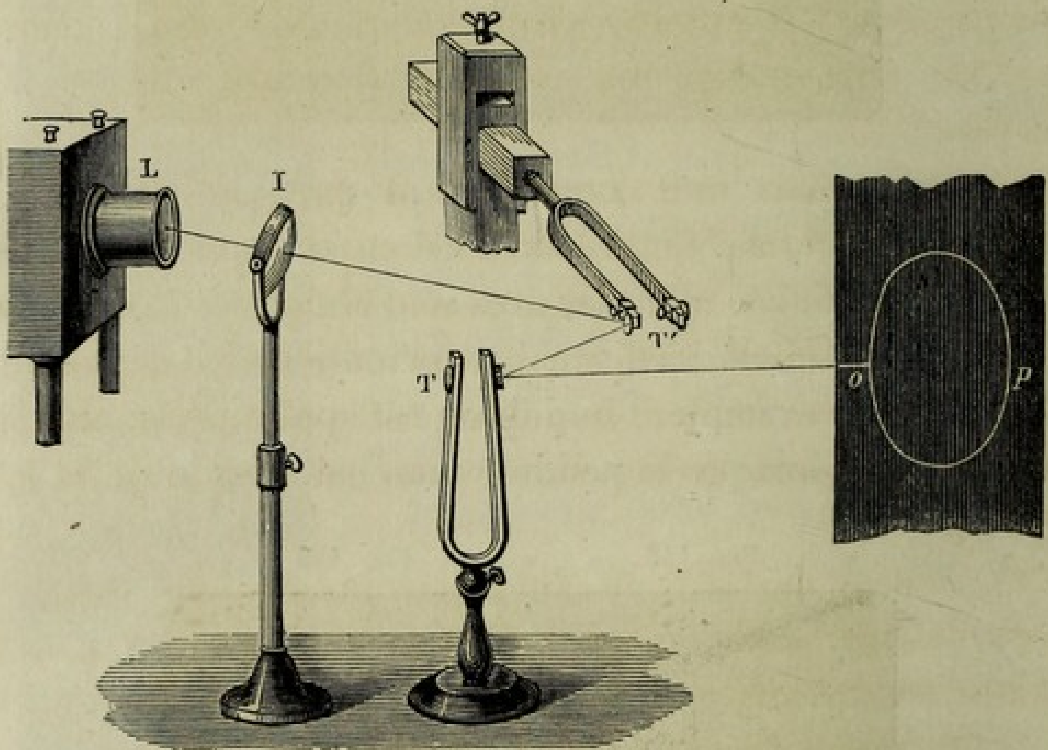


Fig. 152. Fig. 153

position de l'ellipse est celle de la figure 152. Si, au contraire, l'impulsion est appliquée en un point tel que d'', pendant que le pendule marchait vers a, l'ellipse aura la position indiquée dans la figure 153.

Dans le cas de la verge avec laquelle, dans notre quatrième leçon, nous avons réalisé le caléidophone de M. Wheatstone, nous mettions en jeu une combinaison de vibrations du genre de celle qui nous est offerte par le pendule, et c'était cette combinaison qui nous donnait, comme résultat des oscillations de la verge, un cercle, une ellipse ou une ligne droite. Par la méthode de M. Lissajous, nous pourrons combiner les vibrations rectangulaires de deux diapasons, et c'est ce que je vais faire maintenant devant vous. En face de cette lampe électrique L (*fig.* 154), installons le grand diapason T',

Fig. 154.



pourvu d'un miroir sur lequel tombe un mince faisceau de lumière LT'. Ce faisceau réfléchi par le miroir revient vers l'auditoire. Le diapason T' est fixé à un support (qu'on ne voit qu'en partie dans la figure) dans une position horizontale, et imprimera par conséquent au rayon lumineux quand il vibrera des oscillations horizontales à droite et à gauche. Sur le chemin du rayon réfléchi, on place un second diapason T, armé aussi d'un miroir. Mais le second diapason est vertical, et lorsqu'il vibrera, il imprimera au rayon lumineux, comme vous le savez, un mouvement de haut en bas dans un plan vertical. Jusqu'à présent, les deux diapasons sont à l'état de repos. Le faisceau lumineux est renvoyé par le miroir du diapason horizontal sur le miroir du diapason vertical, et par ce second miroir vers l'écran, où il dessine un disque de lumière blanche.

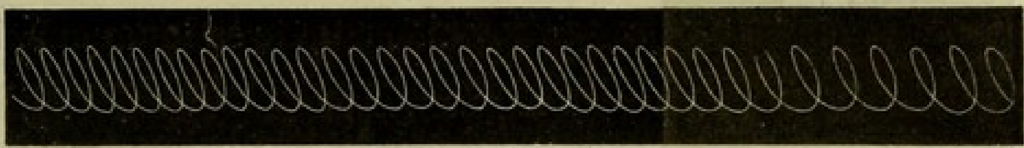
Je fais vibrer le diapason vertical, laissant l'autre en repos. Le disque se transforme en une belle bande lumineuse d'un mètre environ de longueur. Je fais également vibrer le diapason horizontal et la bande rectiligne est immédiatement remplacée par le magnifique anneau *op* (*fig.* 154), dont le diamètre est d'un mètre. Qu'avons-nous donc fait? Exactement ce que nous faisions dans l'expérience du pendule. Nous avons amené les rayons lumineux à vibrer à la fois dans deux directions, et nous sommes tombés accidentellement sur la combinaison qui correspond au cas où l'un des diapasons atteignait précisément la limite de son oscillation, et demeurait un instant au repos, tandis que l'autre passait avec sa vitesse maximum par sa position d'équilibre.

C'est tout à fait par accident que nous avons obtenu un cercle, mais c'est un accident heureux, puisqu'il nous met à même de constater la ressemblance exacte des mouvements du rayon lumineux avec les mouvements du pendule. J'éteins pour un instant les vibrations de l'un des diapasons, et je l'excite de nouveau. Cette fois nous obtenons une ellipse avec ses axes inclinés. Après quelques essais nous arrivons à la ligne droite, et elle indique que les deux diapasons passent en même temps par leurs positions d'équilibre. C'est ainsi que la combinaison des vibrations des deux diapasons nous fait retrouver toutes les figures qu'avaient données le pendule.

Lorsque les nombres de vibrations des deux diapasons sont, dans un temps donné, absolument identiques, la figure tracée dès le premier instant sur l'écran reste invariable dans sa forme, et diminue seulement dans ses dimensions à mesure que le mouvement s'éteint. Mais la plus légère différence entre les vitesses de vibration fait cesser la fixité de l'image. Avant l'ouverture de la séance, j'ai fait tous mes efforts pour faire vibrer ces deux diapasons à l'unisson aussi parfaitement que possible, et voilà pourquoi vous avez remarqué bien peu de changements dans la forme de la figure. Mais en faisant mouvoir un petit poids le long de l'un des diapasons, ou plus simplement en collant contre l'un d'eux un petit morceau de cire, je romps l'unisson, et vous constatez que la figure passe lentement d'une ligne droite à une ellipse oblique, et de l'ellipse oblique à un cercle; après quoi elle redevient une ellipse, mais une ellipse oblique en sens contraire de la première, pour aboutir de nouveau à une ligne droite dont la direction est perpendiculaire à la ligne droite primitive, et repasser dans l'ordre inverse par la même série de formes qui la ramène à la ligne droite horizontale qui a été sa position et sa forme de départ. L'intervalle entre les réapparitions de deux figures identiques est le temps qu'emploie un des diapasons à effectuer une vibration complète de plus que l'autre. Si j'augmente la différence de poids des diapasons, les changements deviennent plus précipités. La ligne droite, l'ellipse, le cercle se succèdent très-rapidement. A certains moments, la courbe lumineuse prend un relief stéréoscopique qui nous force presqu'invinciblement à croire que nous voyons un anneau solide de métal chauffé jusqu'au blanc.

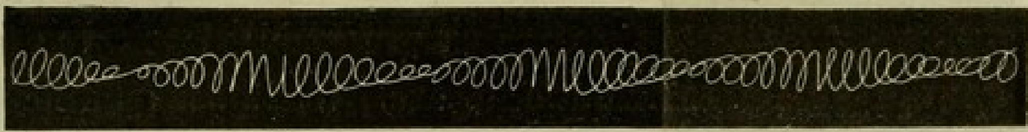
En faisant décrire par rotation un petit arc au miroir du diapason T, on convertit le cercle immobile en une splendide hélice lumineuse, qui s'étale en ligne droite sur toute la longueur de l'écran (*fig.* 155). La même manœuvre, exécutée au moment où le rayon lumineux décrit une figure mobile,

Fig. 155.



nous donne un fuseau en hélice d'amplitude variable ou irrégulière[1] (*fig.* 156).

Fig. 156.

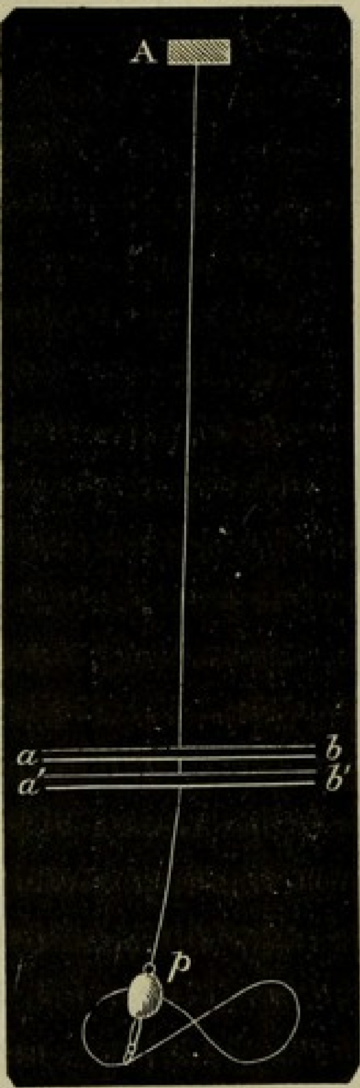


Nous avons maintenant à combiner les vibrations de deux diapasons qui oscillent avec des vitesses doubles l'une de l'autre, c'est-à-dire à déterminer les figures correspondant à une note et son octave. Pour mieux saisir les conditions mécaniques du problème, nous devons revenir une fois encore à notre pendule, car on peut aussi le faire osciller dans une des directions rectangulaires deux fois plus vite que dans l'autre. Nous pourrions le faire d'une manière tout à fait parfaite à l'aide d'une disposition mécanique compliquée, mais pour le moment je préfère le simple au composé. Je dispose sur le trajet du fil du pendule, descendant de son point de suspension A, en avant et en arrière, deux baguettes de verre horizontales *ab*, *a'b'* (*fig.* 157), supportées fixement à leurs extrémités, et à deux centimètres et demi l'une de l'autre. Les baguettes croisent le fil à une hauteur de 2 1/2 mètres au-dessus de la boule ou du poids qui termine le pendule. La longueur totale du pendule étant d'environ

[1] La figure correspond à l'intervalle 15 : 16. Je suis redevable de cette figure et de quelques autres à l'éminent acousticien de Paris, M. Koënig.

10 mètres, les baguettes laissent au-dessous d'elles le quart environ de sa longueur. Ecartons le pendule parallèlement

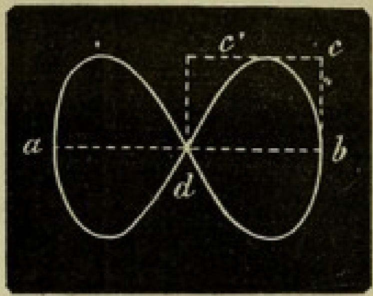
Fig. 157.



aux baguettes, et abandonnons-le à lui-même; il oscille librement entre les baguettes et sur toute sa longueur. Ramenons-le au repos et écartons-le perpendiculairement aux baguettes; il oscille encore, mais seulement sur une longueur de 2 1/2 mètres; or, en vertu des lois des oscillations, un pendule réduit au quart de sa longueur oscille avec une vitesse double. Pour vous faire voir la figure décrite sous l'influence de la combinaison de ces deux vitesses de vibrations, j'ai attaché à la boule de cuivre *p* un petit pinceau en poil de chameau (*fig.* 157), dont l'extrémité effleure une plaque de verre posée sur du papier noir. Je répands sur la plaque de verre un peu de sable blanc, et je fais osciller d'abord le pendule sur toute sa longueur. Le pinceau trace sur le sable une ligne droite qui représente l'amplitude de la vibration. Soit *ab* (*fig.* 158), cette ligne droite que nous supposerons décrite en une seconde comme précédemment. Lorsque le pendule est arrivé à la limite *b* de son excursion, concevons qu'il reçoive une impulsion perpendiculaire à *ba*, capable de le faire arriver en *c* dans un quart de seconde. Si cette impulsion agissait seule sur le pendule, la boule irait en *c* et reviendrait en *b* dans une demi-seconde. Mais dans les circonstances actuelles, elle est aussi poussée vers *d*, point qu'elle devrait atteindre de même en une demi-seconde, entraînée qu'elle est par l'oscillation du pendule tout entier.

Par conséquent, les deux vibrations combinées exigent que la boule atteigne le point *d* au même instant, et pour cela qu'il décrive l'arc de courbe *bc'd*. De même, dans l'intervalle

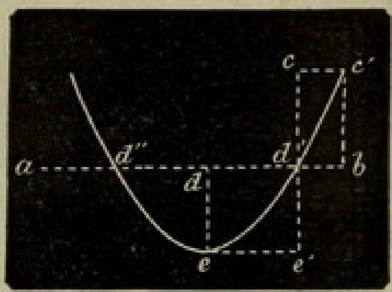
Fig. 158.



de temps employé par le grand pendule à passer de *d* en *a*, le petit pendule parcourra deux fois, c'est-à-dire dans un mouvement de va et-vient, la moitié de son excursion ; sous l'action des deux mouvements combinés, le pendule devra donc atteindre en même temps le point *a*, ce qui exige qu'il décrive l'arc de courbe inférieur entre *d* et *a*. Il est évident que ces deux courbes se répéteront, en sens inverse au-dessous de la ligne *ab*, et qu'en définitive la combinaison des deux vibrations fera décrire au pendule une espèce de lemniscate en forme de huit renversé que vous voyez maintenant dessinée sur le sable.

On obtiendrait la même figure si l'on imprimait au pendule les deux impulsions rectangulaires au moment où il repasse par sa position d'équilibre en *d*. Nous avons supposé que le temps employé par le pendule à décrire la ligne *ab* était une seconde. Admettons qu'il s'est déjà écoulé trois quarts de seconde, que le pendule est en *d'* (*fig.* 159) dans son excursion vers *b*, et que là, il reçoive une impulsion rectangulaire suffisante pour le transporter au point *c* en un quart de seconde. Comme d'ailleurs le grand pendule exige que la boule aille de *d'* à *b* en un quart de seconde, les deux impulsions seront satisfaites si, après un quart de seconde, le pendule a pris la position c'. Après avoir décrit une ligne courbe $d'c'$, il devra évidemment revenir le long de la même courbe, et se retrouver en d' à la fin d'un nouveau quart de seconde. Pour se rendre de d' en d, le long pendule exige un quart de seconde; mais au bout de ce temps le pendule court doit être à la limite inférieure de son excursion; les deux exigences seront satisfaites si le pendule se trouve en e. Nous obtenons ainsi une branche $c'e$ d'une courbe qui se répétera à la gauche de e, et il en résulte que la courbe entière résultant de la combinaison des deux vibrations est représentée par la figure 159. Cette figure a

Fig. 159

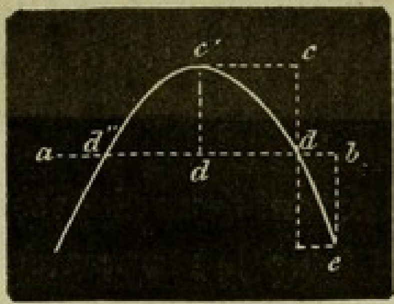


reçu des géomètres le nom de parabole, et l'on appelle lemniscate la courbe en ∞ que nous avons obtenue dans la première expérience.

Nous avons supposé qu'au moment où l'on communiquait l'impulsion rectangulaire, le mouvement du pendule se faisait vers b; s'il avait été dirigé vers a, nous aurions obtenu la même parabole dans une position inverse, représentée par la figure 160.

Supposons enfin que l'impulsion soit donnée non lorsque le pendule passe par sa position d'équilibre, ni lorsqu'il se trouve en un point correspondant aux trois quarts ou à un quart de son excursion, mais en tout autre point de la ligne ab. Nous n'obtiendrons, dans ces nouvelles conditions, ni la parabole, ni la figure parfaitement symétrique en forme de ∞, mais un ∞ déformé, dans une position qui dépendra de la direction du mouvement à l'instant où l'impulsion sera donnée.

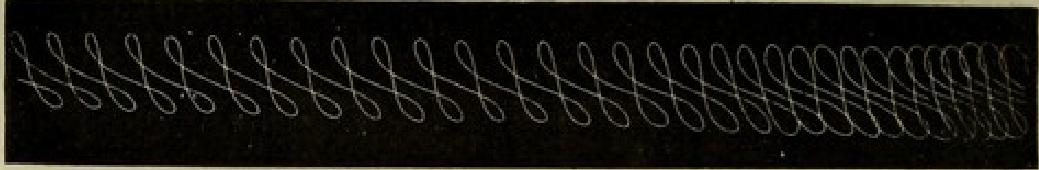
Fig. 160.



Nous sommes maintenant en état d'étudier avec profit les vibrations combinées de deux diapasons, dont l'un sonne l'octave de l'autre. Laissant immobile en face de la lampe le diapason vertical T (*fig.* 154), nous lui opposons un diapason horizontal, qui vibre avec une vitesse double, et au premier coup d'archet qui les fait vibrer, ces diapasons nous révèlent la similitude complète de leur combinaison avec celle des oscillations de notre pendule. Nous voyons dessiné sur l'écran un ∞ d'une régularité parfaite. Avant la séance, j'ai essayé d'amener aussi exactement que possible ces deux diapasons à vibrer dans le rapport de 1 : 2; la fixité de la figure sur l'écran indique que j'ai parfaitement réussi. J'éteins le mouvement des diapasons et je les excite de nouveau : nous avons sur l'écran un ∞ déformé. J'arrête encore les mouvements, et après quelques nouveaux essais je fais apparaître la parabole. Dans toutes ces expériences, la figure est restée fixe sur l'écran; mais je colle un morceau de cire à l'un des diapasons et je les excite. La figure n'est plus permanente, elle passe du ∞ régulier au ∞ déformé, de celui-ci à la parabole et de la parabole elle revient au ∞. En augmentant le désaccord des instruments, nous pouvons rendre ces passages aussi rapides que nous le voudrons.

Lorsque le ∞ est fixe, la rotation du miroir du diapason T fait apparaître sur l'écran la longue bande sinueuse représentée par la figure 161.

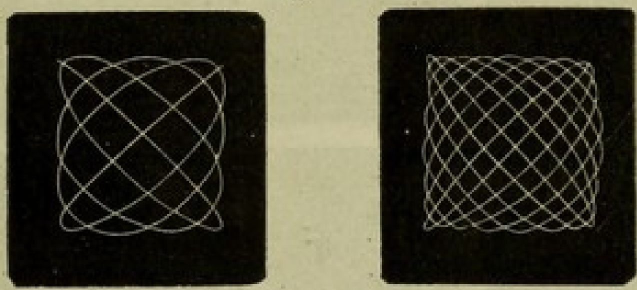
Fig. 161.



Combinons actuellement deux diapasons dont les nombres de vibrations soient dans le rapport de 2 : 3. Remarquez d'abord la permanence admirable de la figure produite par la combinaison de ces deux vitesses de vibration. Avec un peu de cire, j'attache à l'un des diapasons une pièce de cinquante centimes; la fixité cesse, et nous voyons se produire un va-et-vient périodique de courbes lumineuses. Si nous passons aux intervalles de 3 : 4, de 4 : 5 et de 5 : 6, les dessins deviennent de plus en plus compliqués. Dans le cas de la dernière combinaison, de 5 : 6, il est tellement contourné que pour le voir il faut n'employer qu'un très-mince filet de lumière. Et c'est un fait digne de remarque que dans *les figures complétement développées*, les rapports des nombres des sommets ou des contacts avec les bords horizontaux et verticaux donnent le rapport des nombres de vibrations combinés. Nous avons, par exemple, dans le cas de l'octave deux sommets ou deux contacts dans une direction, un dans l'autre; dans le cas de la quinte, deux sommets dans une direction et trois dans l'autre. Dans la combinaison de 1 : 3, les deux nombres des sommets lumineux sont aussi comme 1 : 3. Les changements que subissent quelques-unes de ces figures lorsque le rapport des tons n'est pas exact, ou lorsqu'on surcharge à dessein l'un des diapasons, sont extrêmement remarquables. Dans le cas, par exemple, du rapport 1 : 3, il est parfois difficile de se défendre de la sensation optique d'un arc courbe de métal chauffé jusqu'au blanc. La figure présente un relief apparent tel qu'on ne dirait jamais un dessin tracé sur une surface plane.

Vous avez sous les yeux un tableau de toutes les belles figures résultant des combinaisons de deux tons, depuis le rapport 1 : 1 jusqu'au rapport 5 : 6. On y voit pour chaque cas la série des phases caractéristiques, par lesquelles passent ces figures, lorsque l'intervalle entre les tons des diapasons n'est pas absolument pur. La figure 162 représente deux aspects différents de la combinaison 8 : 9.

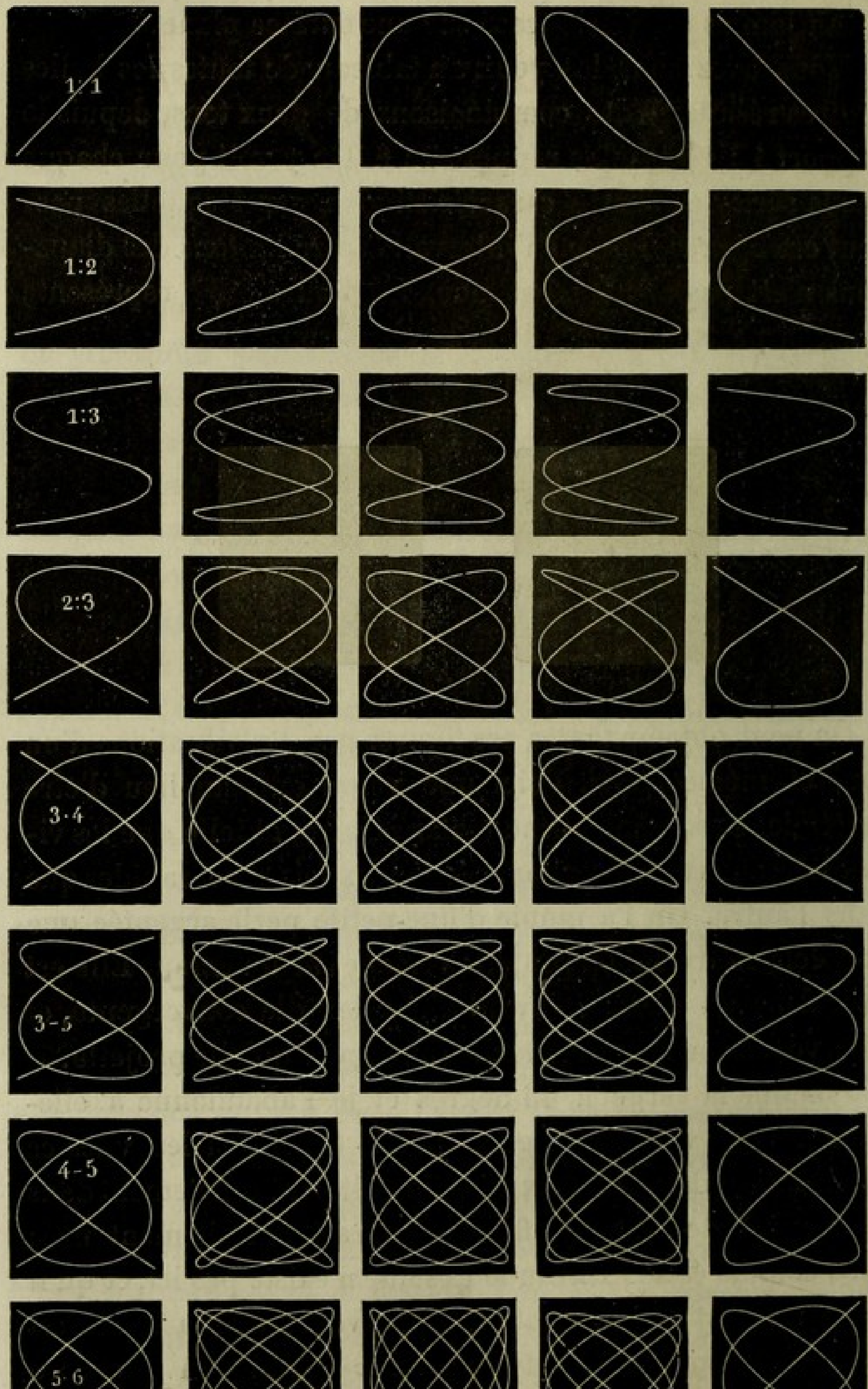
Fig. 162.



On peut obtenir toutes ces figures par les vibrations d'un seul et même corps. Voici une verge qui, au lieu d'être arrondie, a reçu une forme rectangulaire, et telle que les vibrations dans une direction soient deux fois aussi rapides que dans l'autre. On l'a munie d'une petite perle argentée que l'on éclaire et dont on projette l'image sur un écran. Elle est fixée dans un étau, en avant d'une lentille convergente, et vous voyez sur l'écran la tache lumineuse qu'elle projette.

J'incline la verge à 45 degrés et je l'abandonne à elle-même. Vous voyez la figure qu'elle décrit. Si les vitesses de vibration dans les deux directions étaient exactement dans le rapport de 1 : 2, la figure resterait parfaitement fixe; mais comme cette exactitude absolue n'existe pas ici, et qu'il y a seulement approximation, vous voyez que la figure est successivement un ∞ déformé, un ∞ parfait, un ∞ encore déformé mais en sens contraire du premier; voici que pour

Fig 163



un moment elle devient une parabole régulière. Nous obtenons donc précisément la même succession de figures que dans le cas de deux diapasons vibrant dans le rapport de 1 : 2, mais dont on trouble un peu l'accord. Toutes les autres figures produites par la combinaison de deux diapasons pourraient être obtenues de même au moyen des vibrations de simples verges ayant une forme telle qu'elles oscillent avec des vitesses différentes dans les deux directions rectangulaires.

M. Wheatstone a complété son kaléidophone par l'introduction de verges destinées à figurer aux yeux les combinaisons de tous les intervalles musicaux. Il avait en outre inventé plusieurs autres méthodes extrêmement ingénieuses, pour la composition optique des vibrations *sonores*.

Nos leçons tirent à leur fin; mais avant de finir et pour finir de la manière la plus utile, je vous demande de reporter votre attention sur celles des expériences de la troisième leçon, qui avaient pour but l'étude des modes de division d'une corde en segments harmoniques. Nous mettions ces modes divers de division en évidence, en plaçant à califourchon sur la corde de petits cavaliers en papier, qui tour à tour étaient désarçonnés ou restaient en place, suivant qu'ils étaient placés sur des ventres ou sur des nœuds. Mon but actuellement est de mieux faire saisir que je ne l'ai fait jusqu'ici un point de quelque importance, en répétant une expérience de même genre faite par Sauveur. Voici le sonomètre dont nous nous sommes déjà servi, mais on a tendu dans sa longueur deux cordes au lieu d'une, à 7,5 centimètres l'une de l'autre. A l'aide de la clef, on modifie la tension des deux cordes de telle sorte qu'elles résonnent toutes deux à l'unisson parfait. Cela fait, on installe un petit cavalier en papier sur le milieu de l'une d'ellles, et l'on fait vibrer l'autre. Qu'arrive-t-il?

Les vibrations de la corde pincée ou excitée par l'archet se communiquent aux chevalets sur lesquels elle s'appuie, et par les chevalets à l'autre corde. Les impulsions que celle-ci reçoit sont d'abord très-faibles; mais parce que les deux cordes sont à l'unisson, elles s'ajoutent et s'accumulent de plus en plus, jusqu'à ce qu'enfin elles renversent le cavalier de la corde qui n'a pas été touchée.

Toutes les expériences faites sur des cavaliers et une seule corde peuvent être répétées ici avec deux cordes à l'unisson. Par exemple, amortissons une des cordes en un point distant d'une des extrémités d'un quart de sa longueur totale, et plaçons les cavaliers rouges et bleus qui nous servaient dans nos expériences antérieures, non sur les nœuds et les segments vibrants ou ventres de la corde amortie, mais aux points qui, sur l'autre corde, correspondent à ces nœuds et à ces ventres. Lorsqu'on passe l'archet sur le petit segment de la corde amortie, les cinq cavaliers rouges de la corde adjacente sont désarçonnés, tandis que les quatre cavaliers bleus demeurent tranquillement en place. En relâchant l'une des cordes, mettons-la hors d'unisson avec l'autre. Tous mes efforts pour démonter les cavaliers seront désormais devenus impuissants. Cette accumulation d'impulsions que l'unisson rend possible ne l'est plus, et quelque violente que puisse être l'agitation de l'une des cordes, elle ne produit sur l'autre aucun effet sensible.

L'influence du synchronisme peut être mise en évidence d'une manière encore plus frappante, au moyen de deux diapasons sonnant la même note. Plaçons sur cette table deux diapasons identiques, montés sur leurs caisses résonnantes, à la distance de 45 centimètres l'un de l'autre, et passons l'archet vigoureusement sur l'un d'eux, sans toucher à l'autre. Arrêtons le diapason excité, le son est affaibli, mais il n'est nullement éteint. Les vibrations ont été transmises à travers l'air et le bois du premier diapason au second, et le diapason non touché est le seul actuellement que nous entendions. J'attache un morceau de cire à l'un des diapasons, et je le fais vibrer de nouveau; la faculté qu'il avait d'influencer le second a disparu; le changement de vitesse de vibration, quelque faible qu'il soit, a détruit la sympathie qui existait entre eux, et ils ne peuvent plus se répondre. J'enlève la cire, et le diapason non touché répond comme auparavant. Cette transmission de vibrations à travers l'air et le bois est encore possible lorsque les diapasons, montés sur leurs caisses, sont séparés par une distance d'un mètre et plus. Elle peut d'ailleurs se faire à travers l'air seul. Mettons au repos un des diapasons et faisons vibrer l'autre énergiquement. Prenant en main la caisse de celui qui vibre, amenons une de ses branches tout près de celui qui ne vibre pas, de telle sorte que les branches soient dos à dos mais en laissant entre elles une couche d'air. Quelque peu dense que soit le milieu servant de véhicule au son, l'accumulation des pulsations, assurée par l'unisson parfait des deux diapasons, met l'un en état de faire vibrer l'autre. Eteignons subitement le son du diapason excité, et le second, silencieux il n'y a qu'un instant, continuera à faire entendre les vibrations qu'il a reçues de son voisin. Séparons l'un des diapasons de sa caisse résonnante ; par un choc contre un corps résistant, faisons-lui produire des vibrations énergiques; tenu alors dans l'air libre, il rend un son imperceptible. Mais approchons-le très-près du diapason silencieux dressé sur sa caisse. Du sein du silence sort peu à peu un son plein et moëlleux, émis non par le diapason qu'on a primitivement excité, mais par son sympathique voisin.

Divers autres exemples de l'influence du synchronisme, mis successivement en évidence dans le cours de ces conférences, reviennent sans doute d'eux-mêmes à vos esprits; et il serait facile de les multiplier en quelque sorte indéfiniment. Si, par exemple, deux horloges animées par des pendules de mêmes périodes de vibration sont installées contre une même paroi, et que l'un des pendules oscille seul, l'autre restant en repos, les oscillations du pendule en mouvement, transmises à travers la paroi, feront sortir le voisin de son repos. Sous l'action d'une seule impulsion, ce pendule parcourt un arc extrêmement petit; mais il revient à son point de départ juste à temps pour recevoir une impulsion nouvelle. Par la continuation de cette transmission, les impulsions s'ajoutent les unes aux autres, et les oscillations sont assez énergiques pour mettre la seconde horloge en mouvement. C'est de même, par des impulsions parfaitement rhythmées, qu'une voix humaine rendant la note convenable peut faire résonner un verre au point de le briser, et que le son d'un tuyau d'orgue peut faire voler en éclats une vitre de dimension et de tension déterminées.

Il était nécessaire d'insister sur ce point pour mieux faire comprendre la manière dont le mouvement sonore se communique au nerf auditif. Ce nerf, suivant toute probabilité, est mis en mouvement par des corps qui lui sont associés, et qui sont aptes à vibrer sympathiquement à l'unisson des différentes ondes sonores. Dans l'organe de l'ouïe, chez l'homme, nous trouvons d'abord et avant tout l'orifice extérieur de l'oreille fermée au fond par la membrane circulaire du tympan. Derrière cette membrane se trouve la cavité appelée le tambour, et séparée de l'espace situé au-delà, du côté du cerveau, par une cloison osseuse percée de deux orifices, l'un rond et l'autre ovale. Ces orifices sont aussi fermés par des membranes minces. En travers du tambour s'étend une série de quatre osselets : le premier, nommé le *marteau*, est attaché à la membrane du tympan ; le second, appelé l'*enclume*, est lié par une articulation avec le marteau; un troisième petit os, tout rond, rattache l'enclume à l'*étrier*, dont la base ovale est implantée sur la membrane de l'orifice ovale ci-dessus mentionné. Cette base de l'étrier appuie sur la membrane, la couvrant presqu'en entier, ne laissant à découvert qu'un bord tout à l'entour. Au-delà de la cloison osseuse, entre elle et le cerveau, se trouve placé l'organe si extraordinaire qu'on nomme le *labyrinthe*, rempli d'eau, et revêtu d'une membrane sur laquelle sont distribuées les fibres terminales du nerf auditif. La membrane du tympan reçoit-elle un choc, ce choc est transmis par la série des os ci-dessus décrits, et vient se concentrer sur la membrane sur laquelle est implantée la base de l'étrier. Cette membrane transmet la commotion à l'eau du labyrinthe, et celle-ci à son tour la transmet aux nerfs.

La transmission, toutefois, n'est pas directe. Sur un point de l'intérieur du labyrinthe naissent entre les fibres terminales des nerfs des soies élastiques très-fines, terminées en pointes aiguës. Ces soies, découvertes par M. Max Schultze, sont éminemment aptes à sympathiser avec celles des vibrations de l'eau, dont les périodes sont les leurs. Mises ainsi en vibration, les soies éveillent les fibres nerveuses placées entre leurs racines, et produisent la sensation de l'audition. Sur un autre point du labyrinthe, on découvre de petites particules cristallines, désignées sous le nom d'*otolithes;* ce sont les *hœrsteine*, ou pierres acoustiques des Allemands, enfouies dans les filaments nerveux, et qui, alors qu'elles vibrent, exercent une pression intermittente sur les fibres nerveuses adjacentes, contribuant ainsi à l'audition. Les otolithes probablement remplissent une autre fonction que les soies de Schultze ; elles sont appropriées par leur poids à partager et à prolonger les vibrations des sons qui tendraient à s'évanouir trop vite, et qui autrement pourraient échapper à l'attention. Les soies de Schultze, au contraire, en raison de leur extrême légèreté, cèdent immédiatement les sons fugitifs, tandis qu'elles sont éminemment aptes à transmettre des vibrations continues. Il est enfin dans le labyrinthe un organe merveilleux, découvert par M. le marquis Corti, qui, suivant toute apparence, constitue un instrument de musique, avec ses 3 000 cordes tendues [1] de manière à recevoir les vibrations de toutes les périodes, et à les transmettre aux filaments nerveux qui traversent l'organe. Chaque frémissement musical qui arrive à l'organe choisit, parmi toutes les fibres tendues, celle qui convient à son ton, et amène cette fibre à vibrer à son unisson.

De cette manière, et quelque compliqué que puisse être le mouvement de l'air extérieur, ces cordes microscopiques l'analysent et nous révèlent les mille sons constituants dont il se compose.

Dans ces dernières remarques, j'ai essayé de vous apprendre en peu de mots les idées actuellement admises par le plus grand nombre des autorités éminentes, relativement à la transmission du mouvement sonore au nerf auditif. Je ne vous demande pas de les accepter comme des vérités établies, mais seulement comme des opinions probables. Elles présentent l'ensemble des phénomènes sous une forme très-intelligible; et si elles sont condamnées à faire place à une théorie plus exacte, plus complète, on trouvera très-certainement que le merveilleux ne sera en rien diminué par la substitution de la certitude à la probabilité.

[1] Suivant M. Kolliker, tel est le nombre des fibres de l'organe de Corti.

RÉSUMÉ DE LA LEÇON VIII.

Deux sons sont à l'unisson, lorsque le rapport de leurs nombres de vibrations est celui de 1 à 1. Après l'unisson, la consonnance du son fondamental avec son octave, dans le rapport de 1 à 2, est la plus agréable de toutes.

La consonnance de deux notes séparées par l'intervalle appelé *quinte*, ou dans le rapport de 2 à 3, est aussi très-agréable, elle n'a rien de dur pour l'oreille. Viennent ensuite, dans un ordre d'harmonie décroissante, les intervalles appelés : *quarte*, rapport 3 à 4 ; *tierce majeure*, rapport 4 à 5; *tierce mineure*, rapport 5 à 6.

La combinaison de deux notes est d'autant plus agréable à l'oreille que le rapport de leurs vitesses de vibration est exprimé par des nombres plus simples.

Pythagore reconnut le premier, en faisant vibrer une corde divisée dans ses parties aliquotes, que plus le rapport numérique des deux parties de la corde est simple, plus l'accord des deux tons est parfait.

Les sons de la sirène sont des sons composés; elle produit en outre du son fondamental, son octave, la quinte à l'octave, la double octave, etc. Les premiers sons qu'elle émet sont toujours des sons harmoniques. Ce n'est que lorsque le nombre des pulsations d'air dépasse 80 par seconde que le son fondamental accuse sa prédominance sur les sons harmoniques.

Les expériences avec la double sirène mettent amplement en évidence deux choses : la première, qu'un intervalle musical est déterminé, non par les nombres absolus de vibrations des deux notes combinées, mais par le rapport entre leurs nombres de vibrations ; la seconde, que plus les nombres qui expriment le rapport des vitesses de vibration sont simples, plus la consonnance des deux sons est parfaite. L'intervalle d'un *ton* 8 à 9, ou d'un *demi-ton* 15 à 16, sont des dissonances.

Pour expliquer le plaisir de la consonnance, Pythagore et son école se contentaient de dire que tout est nombre et harmonie.

La consonnance, suivant Euler, est la sensation agréable résultant de la perception de l'ordre sans fatigue d'esprit; cette explication est incomplète, car les oreilles les plus exercées à découvrir les plus légères dissonances ne savent rien des rapports de vibrations, et les plus habiles acousticiens ne sont nullement influencés par leur science dans le plaisir qu'une consonnance leur fait.

Il faut chercher, avec M. Helmholtz, la cause physique de la consonnance et de la dissonance dans les battements.

Les flammes chantantes permettent de suivre les battements avec certitude jusqu'à ce qu'ils se convertissent en dissonances, et de constater qu'on peut produire la dissonance par une succession rapide de battements.

Contrairement à la théorie de Thomas Young, l'effet sur l'oreille de la fusion des battements est tout à fait différent de l'effet de la fusion des pulsations. Les battements qui se succèdent avec une vitesse de 33 par seconde font sur l'oreille l'effet d'une dissonance très-désagréable. La dissonance, au maximum quand le nombre des battements est de 33, diminue à mesure que le nombre des battements augmente, et disparaît quand ce nombre est de 132. Au-dessous de 33, les battements peuvent être utilisés dans la musique.

Un bon son musical exige la présence de plusieurs des premiers harmoniques, dont il faut par conséquent tenir compte dans l'appréciation de la consonnance. Pour l'octave, la quinte et la quarte, les nombres des battements, en y comprenant les harmoniques, ne dépassent pas la limite exigée par la consonnance. Il n'en est pas ainsi pour la tierce mineure qui approche de la dissonance. A mesure que les rapports de vibration deviennent plus grands, les battements envahissent de plus en plus l'intervalle.

M. Helmholtz a su représenter par des courbes les effets de consonnance et de dissonance, dans l'hypothèse où les battements sont la cause de la dissonance ; et il a constaté que l'accord entre le calcul et l'expérience, entre les sensations de la vue et de l'ouïe, mettait suffisamment en évidence la vérité de l'hypothèse.

Lorsqu'on fait résonner successivement les notes exprimées par les rapports simples 1, 5/4, 4/3, 3/2, 5/3, 2, on remarque que les intervalles entre 1 et 5/4, 5/3 et 2 sont trop grands et exigent l'intercalation de deux notes exprimées par les rapports 9/8 et 15/8. La série des huit notes ainsi obtenues forme la gamme; ces notes sont représentées par les nombres :

ut	ré	mi	fa	sol	la	si	ut
24,	27,	30,	32,	36,	40,	45,	48.

Un pendule qui reçoit tour à tour deux impulsions rectangulaires décrit soit un cercle, soit une ligne droite oblique à droite ou à gauche, soit une ellipse plus ou moins allongée et inclinée dans un sens ou dans l'autre, suivant la valeur des deux impulsions et l'instant de sa course où le pendule reçoit la seconde. C'était cette même combinaison des impulsions rectangulaires qui faisait décrire aux oscillations de la verge du caléidophone de Wheatstone un cercle, une droite ou une ellipse. Le faisceau lumineux, réfléchi successivement dans l'expérience de M. Lissajous par deux diapasons à angle droit, l'un vertical, l'autre horizontal, décrit les mêmes courbes que le pendule et la verge, un cercle, une ligne droite ou une ellipse.

En faisant osciller un pendule dans l'une des deux directions rectangulaires deux fois plus vite que dans l'autre, on peut lui faire décrire un lemniscate. On peut aussi combiner les impulsions rectangulaires de telle sorte que le pendule décrive une parabole.

En mettant de même en jeu les réflexions du rayon lumineux sur deux diapasons rectangulaires dont les nombres de vibrations ont entre eux les rapports des nombres de la gamme, on obtient les courbes ou figures correspondantes aux diverses consonnances, avec toutes les phases par lesquelles elles passent quand l'intervalle entre les deux diapasons n'est pas absolument pur. Dans toutes les figures complétement développées, les rapports des nombres des sommets ou des contacts avec les bords horizontaux ou verticaux donnent le rapport des nombres de vibrations combinés.

Les vibrations sonores se transmettent sympathiquement d'un corps à un autre, soit à travers l'air et les corps intermédiaires, soit à travers l'air seul, à la condition que les deux corps, deux cordes, deux diapasons, etc., soient aptes à vibrer à l'unisson ou dans une consonnance harmonique. Sous l'influence des impulsions sympathiques s'ajoutant les unes aux autres, le second corps, d'abord au repos, entre en vibration et peut même épuiser ou éteindre le mouvement vibratoire du premier, qui revient au repos. Ce phénomène s'observe très-bien sur deux pendules fixés à une même paroi ou suspendus à une même tringle.

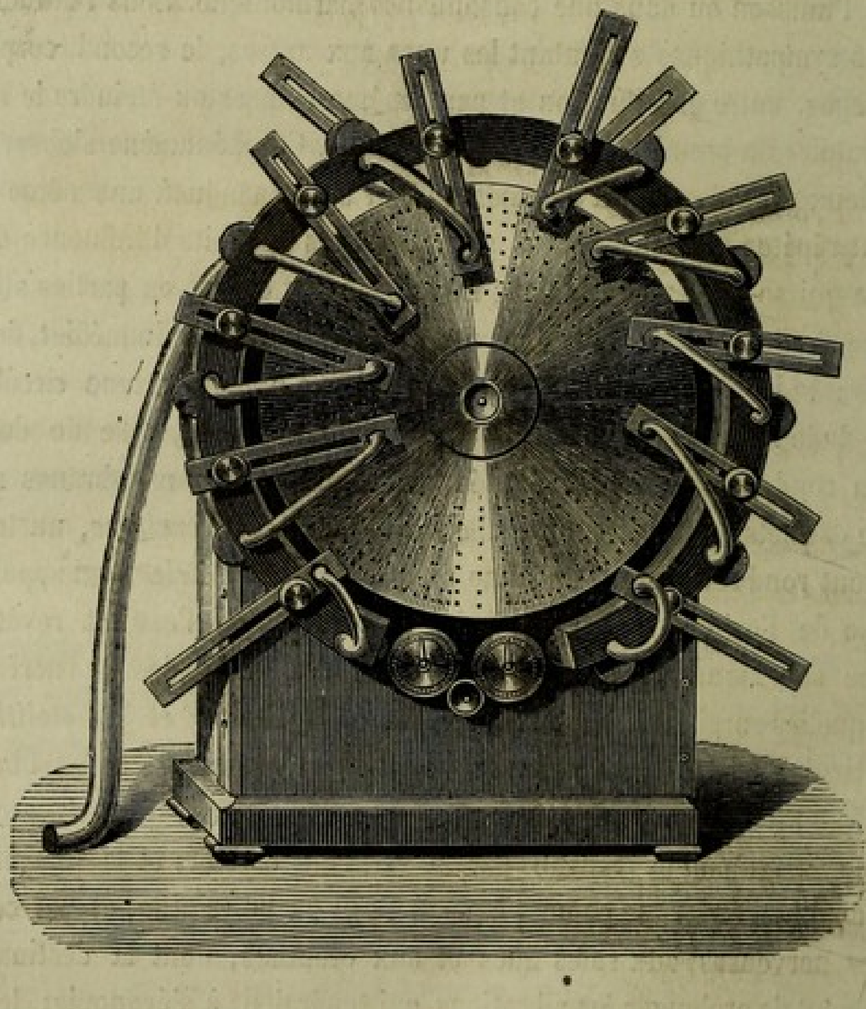
On peut répéter sur deux cordes séparées tous les faits d'influence du synchronisme qui se sont produits dans la division des cordes en parties aliquotes.

L'organe de l'ouïe comprend, dans un ordre de succession immédiat, de dehors en dedans : 1° l'orifice extérieur fermé au fond par une membrane circulaire, le *tympan* ; 2° le *tambour*, terminé par une cloison osseuse percée de deux orifices, l'un rond, l'autre ovale, fermés tous deux par des membranes minces ; 3° quatre osselets en travers du tambour : le *marteau*, l'*enclume*, un troisième petit os tout rond rattachant l'enclume au quatrième os *l'étrier*, qui appuie sur la membrane de l'orifice ovale ; 4° le *labyrinthe*, rempli d'eau et revêtu d'une membrane sur laquelle sont distribuées les fibres terminales du nerf auditif, entre lesquelles surgissent les soies très-fines de Schultze et les *otolithes*, petites particules cristallines ou pierres acoustiques pressant sur les fibres nerveuses ; 5° les cordes microscopiques du marquis de Corti. Le choc, reçu par la membrane du tympan et transmis par la série des osselets et la membrane sur laquelle appuie l'étrier, se communique à l'eau du labyrinthe, et par cette eau aux fibres nerveuses, aux soies fines et aux otolithes, dont la destination est probablement de prolonger les vibrations qui tendraient à s'évanouir ; les cordes microscopiques choisissent dans le frémissement les vibrations qui leur sont sympathiques, l'analysent par conséquent et nous révèlent les sons dont il se compose.

APPENDICE

Grande sirène universelle de M. Koenig, d'après Seebeck. — Les disques en cuivre *(fig. 164)* percés de trous disposés d'une manière symétrique sont au nombre de neuf. Quatre sont destinés à montrer ce qui arrive lorsque l'isochronisme est troublé d'une manière ou d'une autre ; le cinquième sert à démontrer que les impulsions venant de plusieurs points différents peuvent concourir à la formation d'un même son ; le sixième sert aux expériences d'interférences ; le septième porte huit séries de trous qui produisent la gamme des physiciens ; le huitième porte aussi huit séries de trous pour la série des sons harmoniques ; le neuvième enfin sert à étudier les battements.

Fig. 164.



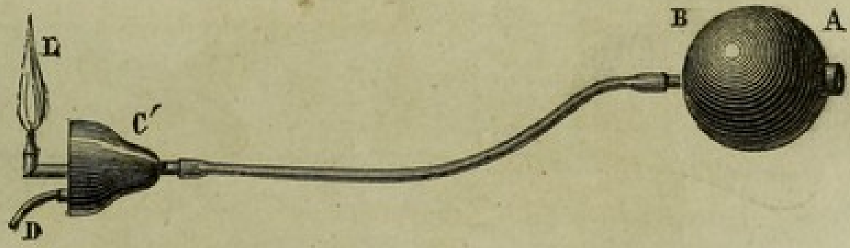
Un fort mouvement d'horlogerie fait tourner les disques ; ce mouvement est renfermé dans une double boîte, afin d'étouffer le bruit des rouages ;

il est en communication avec un compteur qui donne la vitesse de rotation que l'on peut régler et faire varier à l'aide d'ailettes. On peut joindre à cette sirène le disque de M. Oppelt, percé de 24 cercles de trous : 13 de ces cercles émettent des notes simples ; 5 les différents intervalles de la gamme ; 4 des accords.

Tonomètre d'après Scheibler.—C'est une série fondamentale de 65 diapasons échelonnés de 8 en 8 vibrations, entre $ut_3 = 512$ vib., et $ut_4 = 1024$ vib. Chaque diapason est monté sur sa caisse de résonnance, et vibre assez longtemps pour qu'on puisse compter les battements pendant une minute et demie. S'agit-il de déterminer le *ton* ou le nombre de vibrations d'un son quelconque ; on prend dans la série les deux diapasons dont les sons se rapprochent le plus du son donné, en-dessus et en-dessous ; on compte le nombre de battements que les diapasons donnent avec ce son, et l'on obtient immédiatement le son cherché.

Résonnateurs de M. Helmholtz.—Les résonnateurs, appareils destinés à re

Fig. 165.



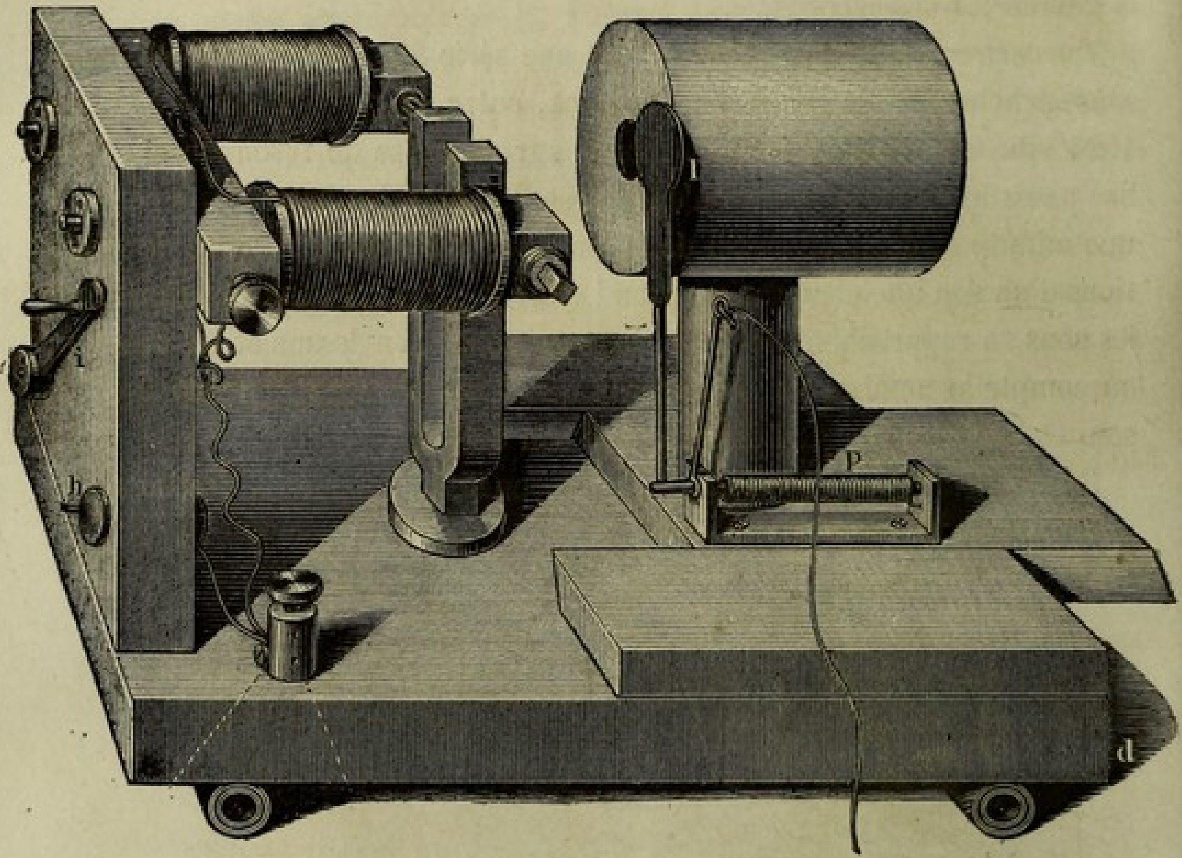
connaître les sons harmoniques qui accompagnent le ton fondamental, sont des globes creux en cuivre A *(fig. 165)*, accordés pour certaines notes, et munis de deux ouvertures : l'une établit la communication avec l'air ambiant ; l'autre est armée d'un petit tube B qui s'enfonce dans l'oreille. Si le mélange des sons harmoniques, qui accompagne le son fondamental, contient la note propre du résonnateur, elle est renforcée et on l'entend résonner très-distinctement. La série complète comprend dix harmoniques en partant de l'ut_2 pris pour son fondamental : ut_2, ut_3, sol_3, ut_4, mi_4, sol_4, 7, ut_5, $ré_5$, mi_5.

Au lieu de faire communiquer directement le petit tube B avec l'oreille, M. Koenig le fait communiquer par un tube de caoutchouc manométrique C′. Toutes les fois que le résonnateur parlera la flamme L sera agitée ; et si on la regarde par réflexion dans un miroir tournant, on verra, non pas une traînée continue de lumière, mais une ligne brillante sinueuse.

Appareil de M. Helmholtz pour la composition artificielle des différents tim-

bres.—Il se compose (*fig.* 166) de huit diapasons donnant respectivement les notes ut_2, ut_3, sol_3, ut_4, mi_4, sol_4, 7, ut_5. Les diapasons sont fixés verti-

Fig. 166.

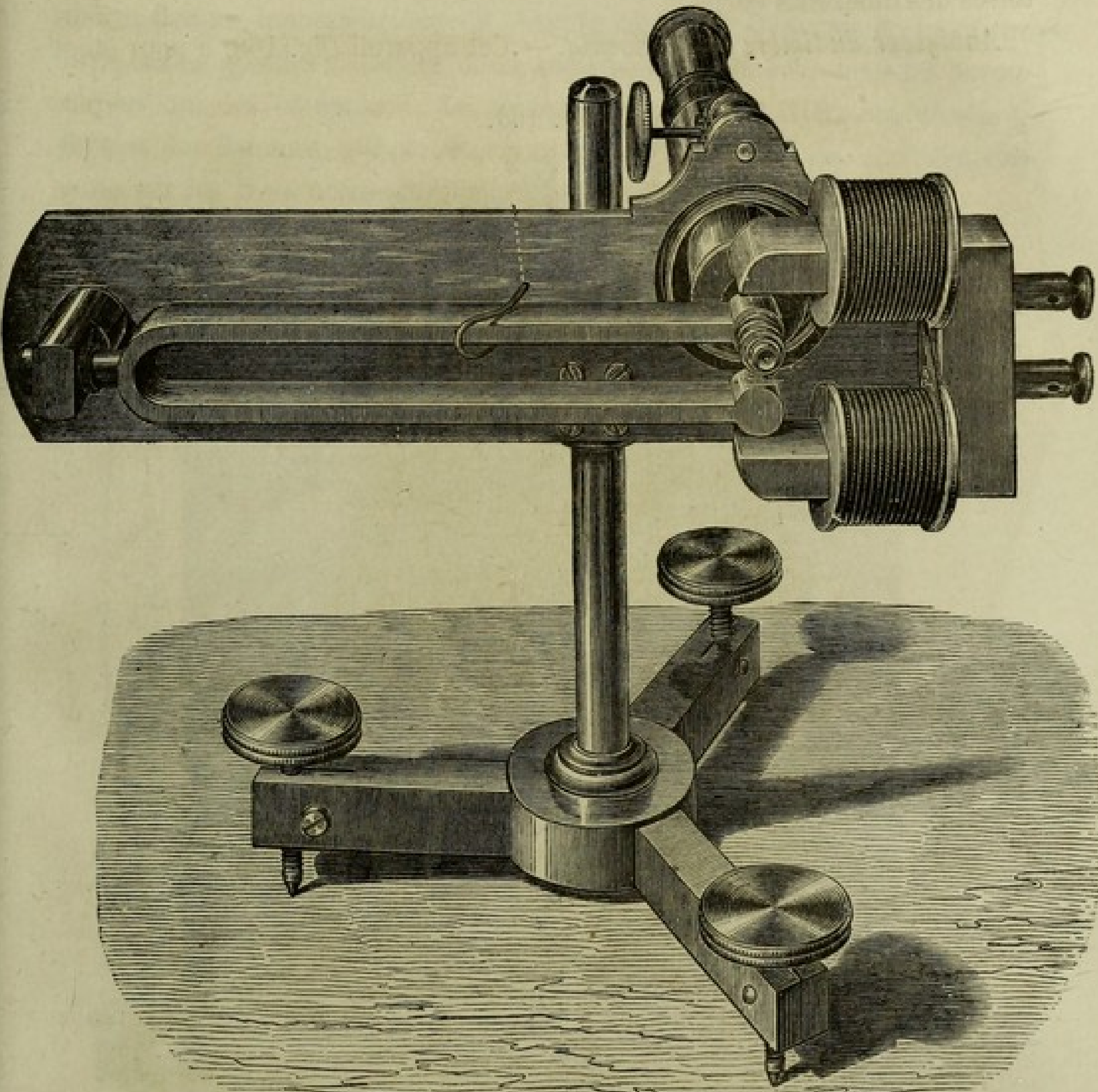


calement entre les branches de huit électro-aimants horizontaux que traverse un courant intermittent. Chaque diapason est muni d'un tube renforçant qu'on peut ouvrir plus ou moins à l'aide d'un clavier en communication avec les orifices. Lorsque les tuyaux sont fermés, les diapasons s'entendent à peine; mais on les fait résonner à volonté en appuyant sur les touches du clavier.

Le timbre des voyelles se distingue de celui des autres sons par cette particularité qu'à chaque voyelle correspond une note fixe qui prédomine toujours dans le mélange de sons qui la compose, quelle que soit d'ailleurs la hauteur de la note fondamentale sur laquelle elle est chantée ou prononcée : cette note fixe est celle qui correspond à la masse d'air renfermée dans la cavité de la bouche pendant l'émission de la voyelle. On a accordé cinq diapasons avec résonnateurs pour les volumes de la cavité de la bouche pendant la prononciation des voyelles *a*, *é*, *i*, *o*, *u*. Si l'on prononce une de ces voyelles à voix basse en tenant le diapason devant la bouche, on entend résonner fortement la masse d'air qui le renferme.

Comparateur optique de M. Lissajous.—Il se compose (*fig.* 167) d'un diapason dont une branche est armée d'un objectif de microscope, et l'autre

Fig. 167.

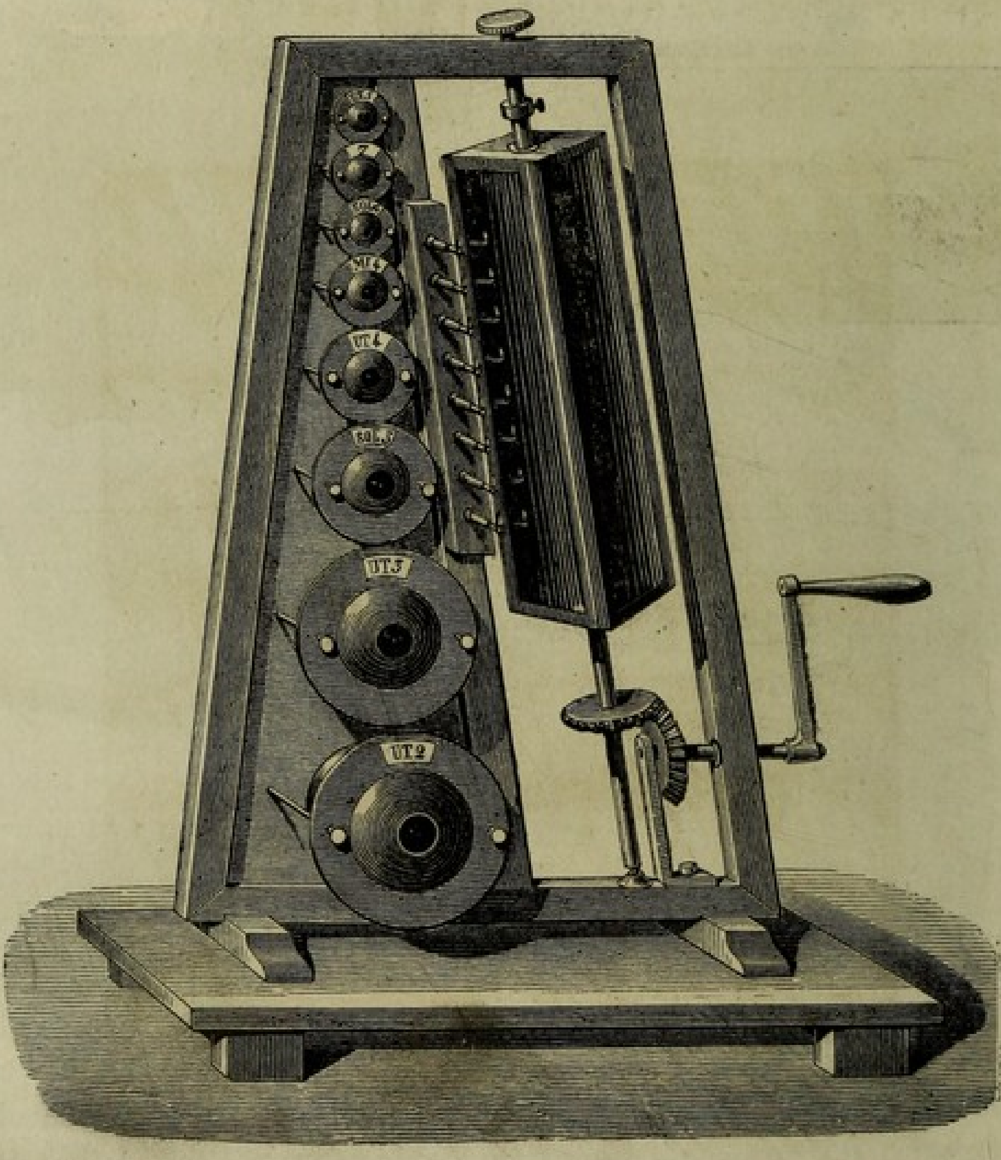


d'un contre-poids. Le corps du microscope avec l'oculaire est fixé sur un support derrière l'objectif, en sorte qu'en observant un point lumineux au travers du microscope, pendant que le rayon vibre, on voit ce point transformé en ligne. Si maintenant le point observé se trouve sur un corps qui vibre lui-même, dans une direction perpendiculaire aux mouvements du diapason, on obtient la figure résultante des deux mouvements vibratoires.

Le diapason est monté entre les pôles d'un électro aimant, qu'on fait traverser par un courant ; un mécanisme interrupteur peut rendre le courant intermittent. Le comparateur sert à l'observation directe, soit des différences de phases entre les corps vibrant simultanément, soit des formes vibratoires des différents corps.

Analyseur du timbre de M. Koenig. — Cet appareil (*fig.* 168) a pour objet

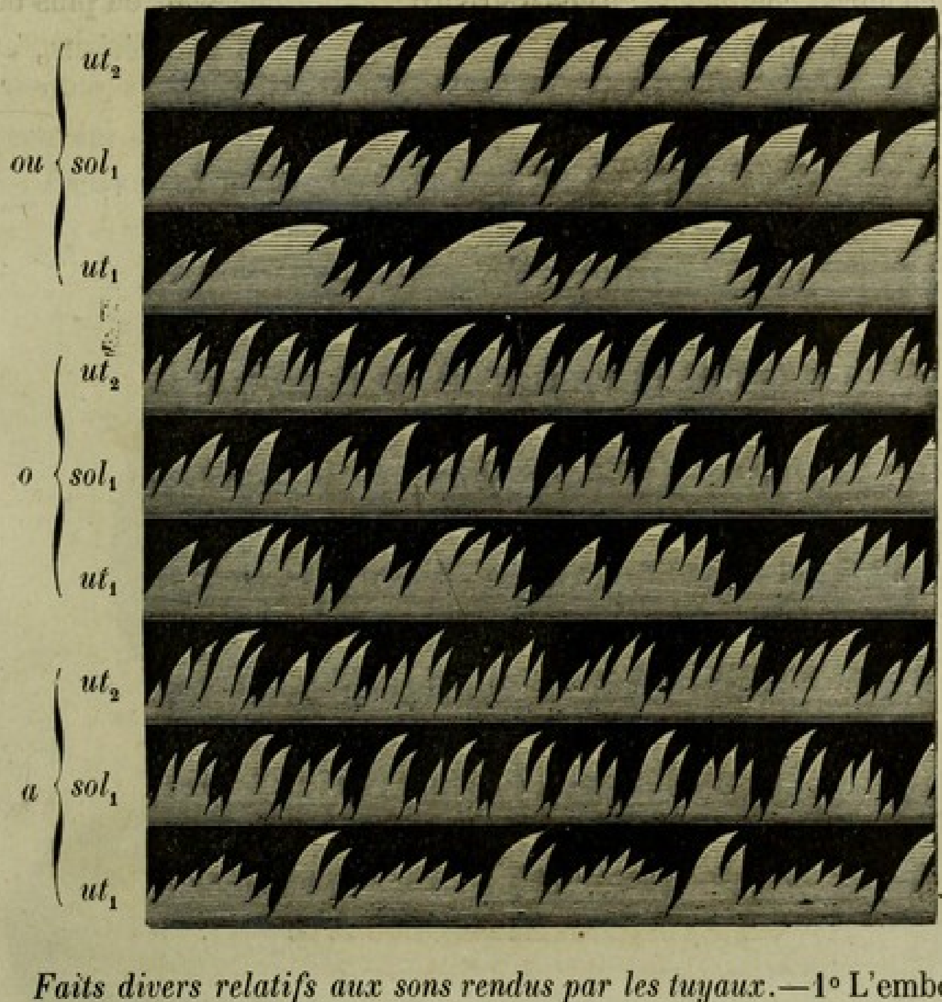
Fig. 168.



de décomposer d'une manière visible le timbre d'un son dans ses notes élémentaires, au moyen des flammes manométriques.

Huit résonnateurs sont fixés sur un support l'un au-dessus de l'autre ; chacun communique par un tube de caoutchouc avec une petite cavité que forme une capsule manométrique. Les becs de gaz de ces capsules sont placés l'un au-dessus de l'autre sur une ligne inclinée ; un miroir tournant, parallèle à cette ligne, décompose celles des flammes qui sont mises en vibration par les globes qui résonnent, tandis qu'il fait paraître sous forme linéaire celles qui sont en communication avec des résonnateurs sur lesquels le son n'agit pas. En faisant agir les sons des voyelles sur une même flamme manométrique, M. Kœnig obtient les images de leurs timbres, telles qu'elles résultent de la superposition de tous les sons harmoniques qui les composent. Le tableau suivant (*fig.* 169) représente les formes des flammes qui caractérisent les voyelles *a*, *o*, *ou*, chantées chacune sur les trois notes ut_1, sol_1, ut_2.

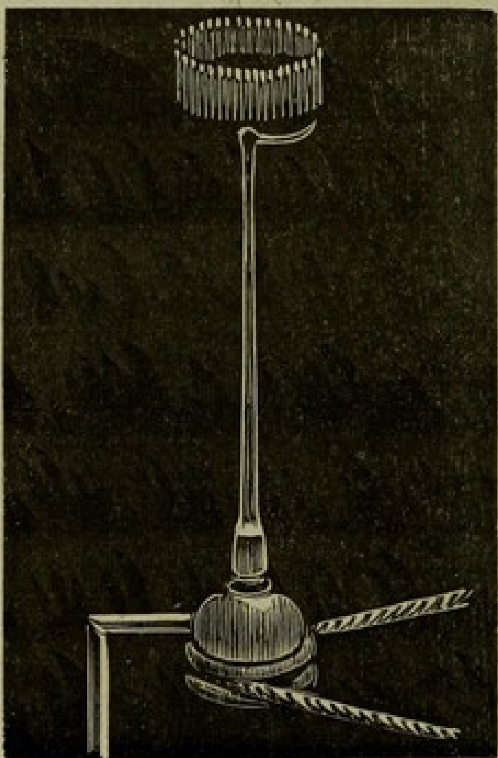
Fig. 169.



Faits divers relatifs aux sons rendus par les tuyaux.—1° L'embouchure et la vitesse du courant ont une influence sur le son d'un tuyau : ce son est d'autant plus grave que l'ouverture de la bouche est plus petite; il est d'autant plus élevé que la vitesse du courant d'air est plus grande. 2° Le son est influencé jusqu'à un certain point par la résistance des parois; il est d'autant plus grave et plus sourd que la résistance des parois est moindre; il est plus grave et moins clair si la surface intérieure des parois est peluchée. Lorsque la résistance est suffisante et la surface intérieure assez lisse, la nature de la paroi n'a plus d'influence sur le son. 3° M. Cavaillé-Coll a trouvé que la longueur d'un tuyau d'orgue est égale à la longueur d'onde théorique du son fondamental de ce tuyau, moins deux fois la profondeur ; la largeur n'ayant presque pas d'influence sur la tonalité.

Appareil à flammes chantantes de M. le comte Schaffgotsch.—Un son produit à distance met en vibration la colonne d'air d'un tube de verre au sein duquel brûle une flamme de gaz (*fig.* 170). La flamme vibre à son tour et fait résonner le tube avec une grande intensité. Si l'on allume les deux petites flammes des becs de l'appareil, et que l'on fasse retentir la note du tube de verre ou son octave grave, la flamme dans l'intérieur du tube s'éteint ; elle aurait commencé au contraire à chanter si elle avait eu plus de volume. Si l'on n'allume que la seule petite flamme du bec extérieur, et

Fig. 170.

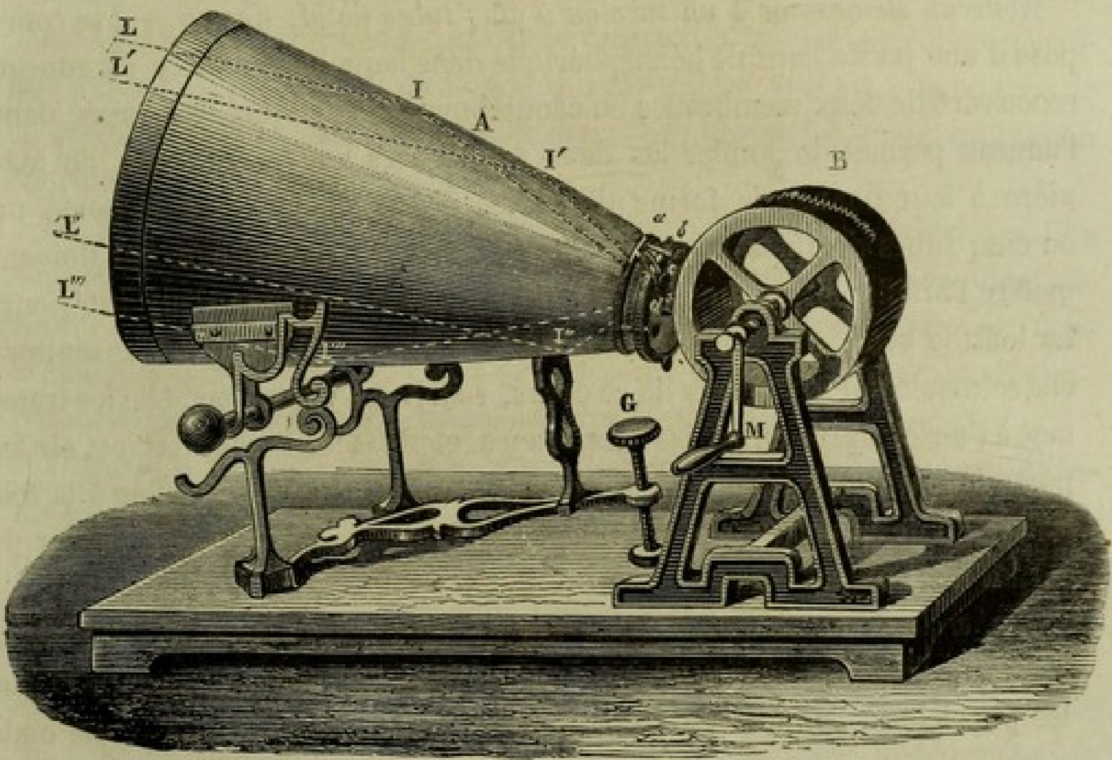


qu'on donne la note du tube, la petite flamme s'élève et peut mettre le feu au grand bec circulaire placé au-dessus, à une distance assez grande pour qu'elle ne puisse pas l'allumer à l'état de repos. Si on met sur les deux becs deux tubes presqu'à l'unisson, on obtient des battements que le mouvement vibratoire des flammes montre aux yeux. Le miroir tournant monté à côté de l'appareil rend visible la discontinuité de la flamme pendant qu'elle chante. Si à l'aide d'une corde on imprime au bec excentrique un mouvement de rotation continu, on voit le cercle lumineux se changer en une couronne discontinue de perles lumineuses.

Appareil d'interférences à diapasons.—Les deux diapasons à l'unisson ut_3 sont montés chacun sur un support entre les pôles d'un électro-aimant, avec ou sans diapason interrupteur ut_2. Si on fait passer le courant par les deux électro-aimants dans le même sens, les deux diapasons offrent la même phase ; et l'on entend le son avec une intensité double, quand les deux diapasons sont placés l'un à côté de l'autre. Si au contraire on fait passer le courant par les deux électro-aimants, de manière que les branches du premier diapason soient attirées au moment où celles de l'autre sont repoussées, il y a interférence. Quand après avoir écarté les diapasons on se place à égale distance de l'un et de l'autre, il y a soit intensité double, si les phases sont les mêmes, soit interférence, si l'on renverse le courant d'un des deux diapasons.

Phonautographe — Il se compose d'un cylindre à mouvement héliçoïdal,

Fig 171



déjà employé par Savart et M. Duhamel ; d'un petit mouvement d'horlogerie à échappement qui permet de déterminer le nombre de vibrations d'une note par la méthode graphique ; d'un diapason chronoscope de M. Wertheim avec son support ; enfin de l'appareil à membrane de M. Scott, qui permet de tracer les mouvements de l'air : A paraboloïde en tôle, terminé par l'anneau *a* ; *b* anneau maintenant la membrane tendue ; *c* pièce mobile servant à modifier la tension de la membrane ; B cylindre recouvert de papier noirci ; LI, L′I′, L″I″, L‴I‴, directions des rayons sonores allant converger au foyer du paraboloïde ; M manivelle pour faire tourner le papier. Avec cet appareil, on obtient facilement les tracés des mouvements vibratoires les plus complexes des corps solides ou gazeux, la notation du temps dans les expériences chronoscopiques, la mesure des nombres de vibrations des sons, etc., etc.

Stroboscope de M. Tœpler.— Si l'on interpose entre l'œil et un corps vibrant un disque percé d'ouvertures équidistantes, et qui tourne avec une certaine vitesse, les vibrations ne sont visibles que par intervalles, et, d'une apparition à la suivante, la phase a généralement changé. La persistance des impressions reçues par la rétine fait alors que les phases successivement visibles se composent pour former des vibrations apparentes que l'on peut ralentir à volonté en réglant convenablement la vitesse du disque. On a ainsi un moyen commode d'étudier la forme des vibrations des différents corps.

Nouveau stéthoscope à un tube ou à cinq tubes de M. Koenig.—Il se compose d'une petite capsule hémisphérique dans laquelle s'enfonce un anneau recouvert de deux membranes en caoutchouc. Une ouverture percée dans l'anneau permet de gonfler les deux membranes par insufflation, de manière à leur donner la forme d'une lentille. La petite capsule porte un ou cinq tubes destinés à recevoir les tuyaux en caoutchouc qui doivent mettre l'oreille en communication directe avec la masse d'air intérieur. La lentille gonflée s'applique sur le corps sonore qu'il s'agit d'ausculter ; elle se moule sur les formes de ce corps, reçoit ses vibrations, elle les transmet à l'air compris entre les membranes et dans les tuyaux, et cet air les porte à son tour à l'oreille. Cinq personnes peuvent ainsi étudier à la fois les bruits de la poitrine, du cœur, etc. Ce même appareil peut servir de cornet acoustique.

Recherches sur la propagation des ondes sonores, *par M. Regnault. Analyse faite par l'auteur*[1]. — Les formules admises jusqu'ici par les physiciens, comme représentant la vitesse de propagation d'une onde dans un milieu gazeux indéfini dans tous les sens, ou renfermé dans un

[1] Si M. Tyndall avait connu à temps la belle série des longues expériences de M. Regnault, il les aurait certainement analysées avec un très-grand soin, parce qu'elles complètent dans les conditions les plus excellentes, c'est-à-dire dans les conditions de la véritable physique de la nature, les recherches antérieures sur la vitesse du son. Nous croyons donc répondre à sa pensée en publiant ce précieux appendice.

tuyau cylindrique et rectiligne, supposent que le gaz jouit de l'élasticité parfaite, et que l'excès de force élastique qui donne lieu à la propagation de l'onde est infiniment petit par rapport à l'élasticité du milieu tranquille. Mais aucun de nos gaz ne satisfait à ces conditions.

En effet, en disant que le gaz jouit de l'élasticité parfaite, on suppose : 1° Qu'il suit exactement la loi de Mariotte ; et l'expérience démontre que tous les gaz s'en écartent plus ou moins ; 2° que son élasticité n'est pas altérée par les corps ambiants : mes expériences sur la propagation des ondes dans un tuyau démontrent que leurs parois exercent une influence très-marquée ; 3° que le gaz n'oppose aucune inertie à la transmission de l'onde : or, mes expériences prouvent que l'émission d'une onde forte produit toujours un *véritable transport* des premières couches gazeuses, lequel augmente notablement la vitesse de propagation, surtout dans la première partie du parcours ; 4° pour tenir compte de l'accélération produite par le dégagement subit de la chaleur qui a eu lieu au moment du passage de l'onde, on admet la loi de Poisson, mais celle-ci n'est exacte que si le gaz jouit de l'élasticité parfaite, et s'il satisfait la loi de Mariotte, etc., etc.

Enfin, le calcul théorique suppose que l'excès de compression qui existe dans l'onde est infiniment petit par rapport à la pression barométrique supportée par le gaz ; or l'onde, à son origine, qui est à la bouche de la pièce, présente, au sortir du canon, par exemple, une compression énorme.

En résumé, la théorie mathématique n'a abordé jusqu'ici la propagation des ondes que dans un *gaz parfait*, c'est-à-dire dans un *fluide idéal* qui réunit toutes les propriétés que l'on a introduites *hypothétiquement* dans le calcul. On ne s'étonnera donc pas de voir que les résultats de mes expériences sont souvent en désaccord avec la théorie.

D'après la théorie, une onde plane doit se propager indéfiniment dans un tuyau cylindrique rectiligne, en conservant la même intensité. Mes expériences démontrent, au contraire, que l'intensité de l'onde diminue successivement, et d'autant plus vite, que le tuyau a une plus faible section. Pour démontrer nettement ce fait, j'ai produit des ondes, d'intensité égale, avec un même pistolet chargé de 1 gramme de poudre, à l'orifice de conduites de sections très-différentes, et j'ai cherché à reconnaître la longueur du parcours au bout de laquelle le coup ne s'entend plus à l'oreille ; j'ai cherché de plus à déterminer le parcours beaucoup plus long au bout duquel l'onde silencieuse cesse de marquer sur mes membranes les plus sensibles. Voici ce que j'ai trouvé :

I. Dans la conduite à gaz d'Ivry, dont la section intérieure est de

$0^m,108$, on entend encore le coup à la seconde extrémité, distante de l'origine de $566^m,7$, mais le son est très-affaibli. Si l'on ferme la seconde extrémité hermétiquement, avec une plaque de tôle, et qu'on place l'oreille à l'orifice du départ, il faut prêter la plus grande attention pour entendre le retour du coup. Ainsi, dans une conduite cylindrique rectiligne du diamètre $0^m,108$, un parcours de 1 150 mètres suffit pour éteindre complétement le son produit par un coup de pistolet, avec une charge de 1 gramme de poudre. Dans la conduite du diamètre de $0^m,30$, de la route militaire, le coup de pistolet s'entend très-distinctement à l'autre extrémité, éloignée de 1 905 mètres. Si l'on ferme cette extrémité avec une plaque de tôle, et qu'on applique l'oreille à l'orifice de départ, on entend encore l'onde réfléchie, mais la perception est à peine sensible. 3° Dans la grande conduite du diamètre de $1^m,10$ de l'égout Saint-Michel, l'onde produite par le coup de pistolet donne un son intense quand elle arrive à l'autre extrémité B, après avoir parcouru un chemin de 1 590 mètres. Après sa réflexion en B, elle revient à l'extrémité de départ A ; après un parcours total de 3 180 mètres, le son s'est affaibli, mais il conserve assez d'intensité pour qu'on l'entende au dehors, sans retirer la membrane qui ferme l'orifice A. Après une seconde réflexion en B et un second retour en A, l'onde a parcouru 6 360 mètres ; on entend encore le coup très-distinctement. Enfin, ce n'est qu'après une nouvelle réflexion en B qu'on n'entend le troisième retour en A, qu'autant qu'un silence absolu règne dans la galerie. Le parcours total est alors de 9 540 mètres.

Ainsi, un coup de pistolet produit par 1 gramme de poudre donne un son qui n'est plus perçu par l'oreille quand il a parcouru :

1159 mètres dans un tuyau dont le diamètre est de $0^m,108$,
3810 mètres dans un tuyau dont le diamètre est de $0^m,300$,
9540 mètres dans un tuyau dont le diamètre est de $1^m,100$.

Les longueurs sont ici sensiblement proportionnelles aux diamètres.

Lorsque l'onde n'a plus assez d'intensité, ou *qu'elle s'est assez modifiée* pour ne plus produire sur notre oreille la sensation du son, elle est encore capable, même après un grand prolongement du parcours, de marquer son arrivée sur nos membranes. Ainsi, avec les ondes produites par une charge de 1 gramme de poudre, les ondes qui imprimaient leur dernière marque sur une membrane avaient parcouru les chemins suivants :

4056 mètres dans la conduite de $0^m,108$,
11430 mètres dans la conduite de $0^m,300$,
19851 mètres dans la conduite de $1^m,100$.

Les causes qui affaiblissent ainsi une onde plane qui se propage dans une conduite cylindrique rectiligne sont de diverses natures, mais la principale tient probablement à ce que l'onde perd constamment une partie de sa force vive par la réaction des parois élastiques du tuyau. On le reconnaît facilement sur la grande conduite, du diamètre $1^m,10$ de l'égout Saint-Michel, qui est suspendue sur des colonnes de fonte, dans une galerie voûtée. Dans le premier trajet de l'onde, on entend au dehors un son très-fort au moment du passage de l'onde, en quelque point de la ligne qu'on se place. Une portion notable de la force vive se dépense donc au dehors. Une seconde cause est l'action de la paroi solide sur le gaz, dont elle diminue sensiblement l'élasticité.

II. D'après la formule de Laplace, la vitesse de propagation d'une onde est la même, quelle que soit son intensité; mais, d'après la formule théorique plus générale et plus complète, cette vitesse doit être d'autant plus grande que l'intensité de l'onde est plus considérable. Donc, puisque dans une conduite cylindrique rectiligne l'intensité de l'onde ne reste pas constante, mais qu'elle diminue successivement, et d'autant plus rapidement que le tuyau a une section plus petite, la vitesse de propagation d'une onde doit diminuer continuellement à mesure qu'elle se propage, et la diminution sera d'autant plus rapide que le tuyau aura une plus petite section. C'est en effet ce qui se présente dans toutes mes expériences; je me contenterai de rapporter ici les vitesses moyennes d'une onde produite par un coup de pistolet qui se propage dans l'air sec, à 0°, et que l'on suit depuis son départ jusqu'au moment où elle n'a plus assez d'intensité pour faire marcher mes membranes. Les expériences qui ont été faites sur les conduites des sections $0^m,108$, $0^m,300$ et $1^m,10$, ont donné les résultats suivants:

1° Dans la conduite de $0^m,108$, la diminution de la vitesse moyenne d'une même onde comptée depuis son départ, mais que l'on prend successivement sur un parcours de plus en plus long, est très-marquée. 2° Les vitesses moyennes, pour des ondes produites avec une même charge de poudre et pour des parcours égaux, sont beaucoup plus grandes sur la conduite de $0^m,300$ que sur celle de $0^m,108$. 3° La vitesse moyenne de propagation sur la conduite du diamètre de 1^m10 diminue moins vite que sur celle du diamètre de 0^m30. 4° Les différences sont encore plus marquées quand nous comparons, sur les trois conduites, les *vitesses moyennes limites* V'_0, c'est-à-dire celles qui correspondent à l'onde assez affaiblie depuis son départ pour ne plus marquer sur nos membranes.

Sur la conduite de	$0^m,108$, $V'_0 = 326^m,66$	chemin parcouru	=	$4055^m,9$
D°	$0^m,300$, $V'_0 = 328^m,96$	d°	=	$15240^m,0$
D°	$1^m,100$, $V'_0 = 230^m,52$	d°	=	$19851^m,3$

Dans ces expériences, l'onde a été produite par la même charge de poudre ; les membranes sont les mêmes ; elles doivent cesser de marquer dans les trois conduites, lorsque l'onde est arrivée à la même faiblesse ; si donc l'affaiblissement de l'onde ne provenait que de la perte de force vive qui se fait à travers la paroi du tuyau, la vitesse moyenne limite devrait être la même dans les trois conduites, puisque l'onde a la même intensité au départ et au moment où elle donne sa dernière marque sur la membrane. Ces vitesses limites étant, au contraire, très-différentes, il faut en conclure que les parois du tuyau exercent encore sur l'air intérieur une autre action que celle que nous venons d'indiquer, action qui diminuerait notablement son élasticité sans changer sensiblement sa densité. Par suite de cette action, *la vitesse de propagation d'une onde de même intensité dans des tuyaux rectilignes serait d'autant plus faible que le tuyau aurait une section moindre*. Il est probable que la nature de la paroi, que son poli, plus ou moins parfait, exercent une influence sur ce phénomène. Je citerai un fait qui semble en donner la preuve. Dans les égouts de Paris, à grande section, on prévient ordinairement les ouvriers par le son de la trompette. Or, ces signaux portent incomparablement plus loin dans les galeries dont les parois sont recouvertes de ciment bien uni que dans celles où les parois sont formées par de la meulière brute.

Pour que cette action des parois sur l'élasticité du milieu gazeux fût absolument nulle, il faudrait que le diamètre du tuyau fût infini ; en d'autres termes, que la propagation du son eût lieu dans l'air libre. Comme elle doit être déjà très-petite dans mes grosses conduites de $1^m,10$, j'ai supposé qu'elle y était nulle, et j'ai conclu que *la vitesse moyenne de propagation, dans l'air sec et à 0°, d'une onde produite par un coup de pistolet, et comptée depuis la bouche de l'arme jusqu'au moment où elle s'est tellement affaiblie qu'elle ne fait plus marcher mes membranes les plus sensibles*, est $330^m,6$.

J'ai cherché aussi à déterminer, sur les grosses conduites de $1^m,10$, la vitesse que possède l'onde la plus affaiblie, que j'appellerai la *vitesse minima*, et je l'ai trouvée égale à $330^m,30$, valeur qui diffère peu de la *vitesse limite moyenne*. Sur les conduites de plus petit diamètre, la vitesse minima est encore moindre.

III. Lorsque l'onde est produite, non plus par l'explosion subite d'un mélange détonant, mais par l'injection d'une petite quantité d'air plus ou moins comprimé, sa vitesse de propagation dans la même ligne de tuyaux est d'autant plus grande que son intensité est plus considérable; elle diminue progressivement. Dans la conduite de $1^m,10$, la vitesse moyenne limite est un peu plus faible.

IV. L'onde résultant de la fermeture brusque de l'orifice par un piston frappeur ou par un disque lancé avec une grande vitesse se comporte de même; la vitesse de propagation diminue sensiblement à mesure que le parcours augmente; elle marche un peu moins vite que celle qui provient du coup de pistolet, mais cela tient uniquement à ce qu'elle a moins d'intensité, car elle n'a jamais marqué sur la membrane un second retour qui correspondrait à un chemin parcouru de $19547^m,0$, tandis que l'onde fournie par le coup de pistolet a marqué constamment plusieurs retours.

V. Les expériences sur les ondes produites par la voix humaine et par les instruments à vent ont mis en évidence ces faits principaux : les sons aigus se propagent avec beaucoup moins de facilité que les sons graves; dans les conduites très-longues, pour bien entendre, il fallait faire chanter une voix de baryton; le son fondamental est entendu avant les sons harmoniques, qui se succèdent suivant leur degré de hauteur; la propagation du son dénature par conséquent son timbre qui résulte du nombre et de la nature des sons harmoniques; dans les conduites très-longues, un air embrassant une certaine étendue de la gamme changerait donc aussi de caractère.

VI. Nos formules théoriques de la vitesse de propagation du son dans l'air ne contiennent pas la pression barométrique à laquelle l'air est soumis. Si donc ces formules sont exactes, *la vitesse de propagation d'une onde dans un gaz est la même, quelle que soit la pression que le gaz supporte.* J'ai donné deux séries d'expériences pour déterminer la vitesse de propagation du son dans l'air, sous diverses pressions, et contenu dans des tuyaux du diamètre de $0^m,108$. Dans la conduite à gaz de la route militaire, près d'Ivry, ayant $567^m,4$ de longueur, les pressions ont varié de $0^m,557$ à $0^m,838$; par suite, la densité de l'air de 1,0 à 1,5. Dans la petite conduite horizontale établie dans la cour du Collége de France, et dont la longueur n'est que de $70^m,5$, les pressions ont varié depuis 0,247 jusqu'à 1,267 : par conséquent, la densité de l'air a changé à peu près de 1 à 5. Il n'a pas été possible de constater une différence dans la vitesse de propagation du son. Mes expériences confirment donc l'exactitude de la loi théorique.

VII. Si l'on compare les vitesses V et V' de propagation d'une même onde dans deux gaz différents, mais à la même température et sous la même pression; si l'on admet qu'ils suivent la loi de Mariotte, qu'ils ont le même coefficient de dilatation, qu'ils satisfont à la loi de Poisson, etc.; en un mot, si l'on admet que ce sont des *milieux gazeux parfaits*, on doit avoir, d'après la théorie, $\frac{V'}{V} = \sqrt{\frac{d}{d'}}$.

De sorte que si l'un des gaz est l'air atmosphérique, et si δ représente la densité de l'autre gaz par rapport à l'air, on a : $\frac{V'}{V} = \sqrt{\frac{1}{\delta}}$.

Je donne dans mon mémoire deux séries d'expériences directes sur les gaz que j'ai pu préparer en quantité suffisante. La première série a été faite sur la conduite du diamètre de $0^m,108$ de la route militaire d'Ivry, et dont la longueur efficace est de $567^m,4$; j'ai pu la remplir successivement de gaz hydrogène, d'acide carbonique et de gaz d'éclairage. Pour la seconde série, j'ai utilisé la petite conduite du Collége de France, qui a la même section, mais seulement une longueur de $70^m,5$; j'ai pu m'en servir pour les gaz acide carbonique, protoxyde d'azote et ammoniac; je réunis en un seul tableau les résultats obtenus sur les deux conduites :

GAZ.	Conduite de $567^m,3$.	Conduite de $70^m,5$.	$\sqrt{\frac{1}{\delta}}$
Hydrogène.	3,801	»	3,682
Acide carbonique.	0,7848	0,8009	0,8087
Protoxyde d'azote.	»	0,8007	0,8100
Ammoniaque. . . .	»	1,2279	1,3025

Si l'on compare les rapports $\frac{V''}{V}$ des deux premières colonnes aux valeurs calculées de $\sqrt{\frac{1}{\delta}}$, on trouve une coïncidence assez remarquable; ces différences seraient certainement plus petites si on avait pu opérer sur des gaz très-purs, mais c'est bien difficile dans des conduites d'aussi grande capacité. De plus, les valeurs de $\sqrt{\frac{1}{\delta}}$ ne sont pas elles-mêmes très-exactes, parce qu'on est obligé quelquefois de prendre pour la densité δ du gaz par rapport à l'air sa densité théorique et non sa densité réelle qui doit seule intervenir.

Mes expériences démontrent donc qu'on peut admettre la loi $\frac{V'}{V} = \sqrt{\frac{1}{\delta}}$, mais seulement comme une *loi limite* à laquelle les gaz satisferaient exactement si on les mettait dans les conditions où ils se comportent comme des *milieux élastiques parfaits*.

VIII. Mes expériences pour déterminer la vitesse de propagation des ondes dans l'air libre ont été faites par la méthode des coups de canon réciproques. L'onde a évidemment au départ une très-grande intensité, mais elle s'affaiblit très-vite à mesure qu'elle se propage sphériquement dans l'espace. De plus, au moment du départ du coup, les couches d'air voisines de la pièce doivent subir un véritable transport, qui augmente encore la vitesse de propagation. Ainsi, par suite de ce transport et de la grande intensité, l'onde doit marcher plus vite, surtout suivant la ligne du tir, dans les premières parties du parcours que dans les suivantes. Mais cette accélération doit s'éteindre très-vite et devenir à peu près insensible quand on fait parcourir à l'onde de grandes distances.

La moyenne de toutes mes expériences donne pour la vitesse moyenne de l'onde sonore dans l'air libre, sec et à 0^o, $V'_0 = 330^m,7$.

Cette vitesse coïncide avec celle qui a été trouvée en 1822 par le Bureau des Longitudes, et elle est à peine supérieure à la vitesse moyenne limite que j'ai trouvée dans mes conduites du plus grand diamètre; l'expérience prouve, en outre, que la vitesse de propagation diminue à mesure que l'onde s'affaiblit, et que l'influence du vent, qui a pour effet de diminuer cette intensité dans une proportion considérable, diminue, par conséquent, la vitesse de propagation.

IX. Mes expériences ont été entreprises principalement dans l'espoir d'obtenir des valeurs rigoureuses du rapport $c' : c$ des deux chaleurs spécifiques des divers gaz, afin d'en déduire la valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur. Elles prouvent que ce rapport varie sensiblement avec la compression du gaz, et n'arrive à une valeur constante qu'autant qu'on le déduit de la vitesse limite, la seule, d'ailleurs, qui soit représentée par la formule de Laplace.

FIN.

TABLE DES MATIÈRES.

C

D

E

T

V

ACTUALITÉS SCIENTIFIQUES,

PAR M. L'ABBÉ MOIGNO.

Envoi franco dans toute la France, contre mandat de poste ou timbres-poste.

I.

ANALYSE SPECTRALE DES CORPS CÉLESTES, par W. HUGGINS; traduit de l'anglais par M. l'Abbé *Moigno*. In-18 jésus de VIII-60 pages, avec figures dans le texte; 1866.......................... 1 fr. 50 c.

SOMMAIRE : Spectres de divers ordres. — Méthodes d'observation. — Soleil. — Lune et planètes. — Étoiles fixes, colorées, variables, changeantes. — Nébuleuses résolues et non résolues; leur éclat, leurs dimensions. — Comètes. — Bolides, étoiles filantes.

Cet ouvrage est un excellent résumé d'Astronomie étudiée à l'aide du spectroscope.

II.

1° CALORESCENCE. — 2° INFLUENCE DES COULEURS ET DE LA CONDITION MÉCANIQUE SUR LA CHALEUR RAYONNANTE, par J. TYNDALL; traduit de l'anglais par M. l'Abbé *Moigno*. In-18 jésus de 88 pages, avec figures dans le texte; 1867....................... 1 fr. 50 c.

SOMMAIRE : Spectre de la lumière solaire; radiations visibles et invisibles. — Spectre de la lumière électrique. — Ses radiations lumineuses, calorifiques, chimiques. — Maximum et minimum de chaque radiation. — Interception des radiations calorifiques et lumineuses; absorption par la dissolution d'alun, par le sulfure de carbone, par la dissolution de l'iode dans le sulfure de carbone; filtrage des rayons. — Foyer des rayons obscurs de la lumière électrique. — Image thermographique du foyer obscur; combustion, incandescence, fusion, vaporisation au foyer obscur. — Calorescence et fluorescence. — Appareils simples pour la mise en évidence des foyers obscurs. — Expériences grandioses au foyer obscur de la lumière solaire. — Calorescence à travers des verres de couleurs diverses. — Expériences de Franklin sur les étoffes, répétées et mieux interprétées. — Différences d'échauffement de deux cartes recouvertes, l'une d'alun, l'autre d'iode. — Soufre et phosphore. — Corps athermiques et diathermiques. — Radiations relatives des poudres appliquées à la gomme, noyées dans le ciment de soufre ou maintenues électriquement. — Transmissions relatives, à travers le cristal de roche, des substances élevées à la température de 100 degrés.

III.

LA MATIÈRE ET LA FORCE, par J. TYNDALL; traduit de l'anglais et suivi d'une dissertation sur **l'essence de la matière, la constitution des corps et la synthèse des phénomènes physiques**, par M. l'Abbé *Moigno*. In-18 jésus de 74 pages; 1867.................. 1 fr. 50 c.

SOMMAIRE : Tendances invincibles de l'esprit humain. — Recherche des causes. — Manifestation directe de la force. — Force simplement attractive. — Force polaire. — Forces invisibles et moléculaires. — Pôles et orientation des molécules. — Aimantation et attraction produites par le courant électrique. — Chaleur produite par le passage du courant. — Décomposition de l'eau. — Recomposition de l'eau. — Choc des atomes. — Cristallisation de l'eau. — Arbre de Diane, arbre de Saturne. — Structure admirable de la glace. — Cristallisation du ferrocyanure de potassium et du chlorhydrate d'ammoniaque. — Forces végétales nées des forces moléculaires. — État présent de la surface du globe, affinités épuisées, affinités actives. — Origine de la force mécanique. — Origine de la force animale. — Physicien matérialiste. — Problème de l'univers. — Ame, instrument de musique ayant sa gamme propre. — Le grand Architecte de l'Univers. — Le mystère de la matière, et sa constitution intime.

Il semble impossible de descendre plus profondément dans le mystère de la matière et d'exposer plus nettement la grande synthèse des phénomènes de la nature par la matière et le mouvement, *nec plus ultra* du progrès.

IV.

LES ÉCLAIRAGES MODERNES, par M. l'Abbé *Moigno*. In-18 jésus de 104 pages, avec figures dans le texte; 1867.................... 2 fr.

SOMMAIRE : *Éclairage aux huiles de pétrole.* — Nature et essai des huiles de pétrole. — Lampes avec liquide. — Gaz-Mille, formé des vapeurs du pétrole. — Lampes sans liquide. — *Éclairage au magnésium.* — Lumière du magnésium. — Lampe Salomon, lampe Larkin. — Application de la lumière du magnésium. — *Éclairage au gaz oxhydrogène.* — Rôle de l'oxygène dans l'éclairage. — Production industrielle et économique des gaz oxygène et hydrogène. — Lumière Drummont. — Lumière Carlevaris. — Lumière Tessié du Motay et Maréchal. — Divers modes d'emploi du mélange oxhydrogène. — *Éclairage à la lumière électrique.* — Nature et propriétés de la lumière électrique. — Génération de la lumière électrique par les machines magnéto-électriques ou électro-dynamiques de la compagnie *l'Alliance,* de M. Wilde, de M. Ladd. — Régulateurs de lumière électrique de M. Serrin, de M. Foucault. — Avenir de la lumière électrique. — Condenseur de lumière de M. d'Henry. — Lunette de nuit à la lumière électrique, de M. Georgette Dubuisson, capitaine de vaisseau. — *Régulateurs de la pression des gaz servant à l'éclairage, de M. Giroud, de Grenoble.* — Nécessité de la régularisation de la pression. — Régulateur de distribution intérieure. — Régulateur de réseau. — Usage du régulateur pour l'examen physique de la pureté et de la richesse du gaz d'éclairage. — *Appendice.* — Lampe simili-gaz de M. Boital. — Lampe à mèche circulaire de M. Maris. — Éclairage aux huiles lourdes de goudron de M. Donny. — Soufflerie hydraulique de M. Maris. — Succès de l'éclairage au gaz oxhydrogène. — Production de l'oxygène par la baryte, procédé de M. Gondolo. — Production de l'oxygène par le protochlorure de cuivre, procédé de M. Mallet. — Multiplication de la lumière électrique : M. Le Roux. — Applications nouvelles de la lumière électrique.

V.

SEPT LEÇONS DE PHYSIQUE GÉNÉRALE, par A. Cauchy; augmenté d'une **Notice historique** et d'un **Appendice** sur beaucoup de questions à l'ordre du jour, par M. l'Abbé *Moigno*. In-18 jésus de XII-108 pages; 1868.. 1 fr. 50 c.

Sommaire : Activité scientifique du XIX^{e} siècle. — Nécessité et recherches de la vérité. — Précautions à prendre. — Multitude de corps. — Essence de la matière. — Propriétés de la matière. — Grandeurs géométriques et nombres. — Repos et mouvement. — Vitesse. — Résultante des forces. — Lois générales de la Mécanique. — Inertie, masse, temps, espace et éther. — Principes du centre de gravité et des aires. — Points en repos dans l'univers. — Impossibilité du nombre actuellement infini. — Démonstration mathématique de l'existence de Dieu. — Infini et continu. — Récente apparition de l'homme sur la terre. — L'antiquité de l'homme jugée par les fossiles, les langues, les institutions et les monuments. — La science sauvegardée par la foi. — L'homme géant et l'homme matériel.

VI.

PHYSIQUE MOLÉCULAIRE, ses conquêtes, ses phénomènes et ses applications; **Résumé des travaux accomplis dans les vingt dernières années**; par M. l'Abbé *Moigno*. In-18 jésus de 212 pages, avec figures dans le texte; 1868.. 2 fr. 50 c.

Sommaire : Constitution des corps et cohésion des solides. — Adhésion, diffusion, osmose, dialyse, transpiration des liquides. — Histoire et théorie de la diffusion, de l'osmose et de la dialyse. — Applications industrielles de la diffusion, de l'osmose et de la dialyse. — Constitution dynamique, adhésion, absorption, diffusion, effusion, transpiration des gaz. — La physique moléculaire dans ses rapports avec les changements d'état des corps. — L'ébullition, la vaporisation, la congélation, la cristallisation, la dissociation, etc. — Physique moléculaire dans ses rapports avec la théorie mécanique de la chaleur. — *Épilogue :* matière et esprit. — Mystère de l'esprit et mystère de la matière. — Matérialistes gribouilles.

VII.

CHALEUR ET FROID, six Leçons faites devant un jeune auditoire, pendant les vacances de Noël 1867, par J. Tyndall; traduit de l'anglais par M. l'Abbé *Moigno*. In-18 jésus de 124 pages, avec figures dans le texte; 1868.. 2 fr.

Sommaire : I. Nature de la chaleur et moyens divers de l'engendrer; frottement, percussion, combustion, changement de volume produit par la chaleur. — II. Dilatation par la chaleur; force d'expansion causée par la chaleur; moyen de mesurer la chaleur; thermomètres. — III. Vents et brises; neige et glace; glaciers; geysers d'Islande. — IV. Théorie et imitation des geysers d'Islande; équivalent mécanique de la chaleur; dépense de chaleur dans le travail intérieur ou extérieur de la vaporisation, de la cristallisation, etc.; chaleur spécifique des corps; propagation de la chaleur dans les gaz, les liquides, les solides. — V. Chaleur rayonnante; réflexion et absorption de la chaleur rayonnante. — VI. Réflexion, réfraction et absorption de la chaleur rayonnante; la chaleur du Soleil; rayons visibles et invisibles; séparation de la lumière et de la chaleur. — *Appendice :* nature du froid.

VIII.

SUR LA RADIATION, par J. Tyndall; traduit de l'anglais par M. l'Abbé *Moigno*. In-18 jésus de 60 pages........................ 1 fr. 25 c.

Sommaire : Radiation visible et invisible. — Éther et théorie atomique. — Absorption de la chaleur rayonnante par les gaz, par l'iode. — Foyer de chaleur invisible. — Rayons visibles et invisibles. — Combustion par les rayons invisibles. — Calorescence. — Insensibilité de l'œil par les rayons invisibles. — Absorption par les vapeurs, par les odeurs, par les vapeurs aqueuses. — Réciprocité de la radiation et de l'absorption. — Analyse physique de la respiration humaine. — Sciences physiques et imagination. — Monde visible et invisible

IX.

SUR LA FORCE DE COMBINAISON DES ATOMES, par A.-W. Hofmann; traduit de l'anglais et augmenté d'un petit **Traité de philosophie et de synthèse chimique**, par M. l'Abbé *Moigno*. In-18 jésus de 68 pages, avec figures dans le texte.................................. 1 fr. 25 c.

Sommaire : Petit nombre des substances élémentaires ou simples. — Nombre immense des composés. — Combinaisons en séries par adjonction successive d'une, deux, trois, etc., molécules de l'un des éléments, oxygène, azote, carbone. — Combinaisons par molécules isolées ou associées. — Raison du mode d'action individuelle de l'oxygène, de l'hydrogène, de l'azote. — Représentation graphique du mode d'adjonction. — Contraction et dilatation égales de tous les gaz. — Jolie démonstration expérimentale. — Capacité de fixation et puissance de combinaison des molécules. — Molécules univalentes, bivalentes, trivalentes, etc. — Formation d'une molécule d'acide chlorhydrique, d'eau, d'ammoniaque, de gaz des marais. — Série chlorhydrique, éthyle, éthylamine, éthylène, propyle, méthyle. — Molécules achevées et inachevées. — Composés saturés et non saturés. — Appendice sur la philosophie chimique. — Synthèse et raison théorique de toutes les lois de la chimie. — Identité des derniers atomes de matière. — Constitution des molécules des corps. — Loi de Prout. — Isomorphisme. — Lois de la conservation de la matière. — Loi des proportions définies. — Loi des proportions multiples. — Loi des équivalents. — Loi des combinaisons composées. — Nombres harmoniques. — Loi de Dulong et Petit. — Loi de Faraday.

IMPRIMERIE DE GAUTHIER-VILLARS, successeur de MALLET-BACHELIER.
Paris, rue de Seine-Saint-Germain, 10, près l'Institut.

LA VIE ET LES TRAVAUX

DU

BARON CAUCHY,

MEMBRE DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES;

PAR

C.-A. VALSON,

PROFESSEUR A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE GRENOBLE;

AVEC UNE PRÉFACE DE M. HERMITE,

MEMBRE DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES.

DEUX VOLUMES IN-8; 1868. — PRIX : 8 FRANCS.

En envoyant à l'Éditeur un mandat sur la poste ou des timbres-poste, on recevra l'ouvrage franco dans toute la France.

Montaigne a dit quelque part que le but principal des études historiques est de « pratiquer les grandes âmes des meilleurs siècles ».

Nous ajouterons, avec l'Auteur, que c'est un devoir pour chaque génération de ne pas laisser périr la mémoire de ses grands hommes et de transmettre fidèlement aux générations suivantes, non-seulement le dépôt intact de leurs travaux, mais encore le souvenir de leurs actions et de leurs exemples.

Ce devoir, M. Valson vient de le remplir à l'égard de Cauchy.

Dans le premier volume de l'Ouvrage que nous annonçons, il raconte d'abord la vie de ce savant illustre, qui a honoré la science, autant par les qualités du cœur et de l'esprit que par l'élévation du génie; il entre dans le détail de ses pensées, de ses actions, de ses bonnes œuvres, et il montre l'homme lui-même en reproduisant fidèlement les traits principaux de sa vie. Dans toute cette partie, règne un ton ému qui en rend la lecture attachante. M. Valson donne ensuite aux lecteurs étrangers à l'étude de la science algébrique une idée simple et exacte des découvertes scientifiques de Cauchy. S'attachant aux grandes lignes qui se dessinent assez nettement pour que tous les yeux puissent les apercevoir, il fait comprendre, sans entrer dans le détail des procédés techniques, la nature et l'importance des questions résolues, des progrès réalisés.

Le second volume s'adresse particulièrement aux hommes spéciaux, qui ont besoin de connaître plus à fond les doctrines de Cauchy et de s'orienter parmi ses innombrables productions qui embrassent à peu près toutes les branches de la science, depuis la Théorie des nombres et la Géométrie pure jusqu'à l'Astronomie et l'Optique. Les Ouvrages et les 790 Mémoires de Cauchy se trouvent répartis dans douze Chapitres classés par ordre de matières. Chacun de ces Chapitres contient l'indication complète de tous les Mémoires qui s'y rapportent, de manière que d'un seul coup d'œil on puisse immédiatement se former une idée exacte des travaux de Cauchy sur chaque spécialité, et qu'on soit en mesure de retrouver sans perte de temps les Mémoires qu'on aura besoin de consulter. De plus, en tête des Chapitres, se trouvent, sous le nom de *Sommaires,* de courtes analyses qui forment des études d'ensemble d'une grande valeur, et qui permettent de se former une première idée de la route parcourue par le savant et de la succession de ses découvertes dans telle ou telle direction.

En résumé, nous ne saurions trop recommander l'œuvre de M. Valson, dont on peut dire, avec un savant distingué, que « c'est à la fois un bon livre et une bonne action. »

L. M. (1868.)