

Bibliothèque numérique

medic@

Gariel, C.-M.. - Des phénomènes physiques de l'audition

1869.

Paris : A. Parent, imprimeur de la Faculté de médecine
Cote : 90975

2

FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS

DES

PHÉNOMÈNES PHYSIQUES

DE L'AUDITION

THÈSE

PRÉSENTÉE AU CONCOURS POUR L'AGRÉGATION

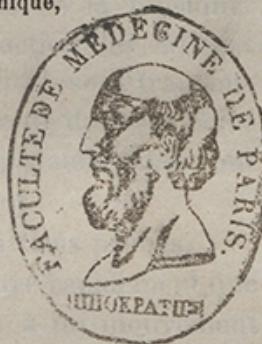
ET SOUTENUE A LA FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS

Le jeudi 29 juillet 1869,

Par C. -M. GARIEL,

DOCTEUR EN MÉDECINE,

Ancien élève de l'École Polytechnique,
Licencié ès sciences physiques.



PARIS

A. PARENT, IMPRIMEUR DE LA FACULTÉ DE MÉDECINE

rue Monsieur-le-Prince, 31

1869

0 1 2 3 4 5 (cm)

ACADEMIE DE MEDECINE DE PARIS

DR

PHENOMENES PHYSIQUES

DE L'AUDITION

THESE

PRESENTEE AU CONCOURS POUR L'AGREGATION

ET SOUTENUE A LA FACULTE DE MEDECINE DE PARIS

Le Jeudi 20 Juillet 1880

Par G. M. GARRIET

DOCTEUR EN MEDECINE

AGENCE GENERALE DE L'EDUCATION PUBLIQUE

LIBRAIRIE DES SOCIETES PARISIENNES



PARIS

LE GOUVERNEMENT DE L'ACADEMIE DE MEDECINE

Le Jeudi 20 Juillet 1880

1880

du son considérable comme résultant de la combinaison de diverses
de les modifications diverses du genre peuvent présenter
au même temps des tons individuels les genres propres
plus analogues ou moins rapportées les uns et les autres
Toutefois de l'origine du son même de l'ouïe ou de l'audition peuvent être
particularisées trois parties.

Nous nous sommes efforcés de présenter au lecteur
ce sujet de la manière la plus simple sur la base de nos observations
et de nos expériences.

Les phénomènes physiques de l'audition comprennent
les modifications diverses des milieux élastiques qui
doivent exister sans interruption entre le corps dit sonore qui est la cause de la production d'un mouvement vibratoire et le nerf auditif qui est chargé de nous donner la connaissance de ce mouvement vibratoire par une sensation spéciale : ces modifications diverses correspondent à des perceptions également variées qui sont en particulier la base du langage et de la musique. Nous avons à étudier et les modes d'action des milieux élastiques, et la manière dont ces actions sont transmises au nerf auditif : la question présente donc un point de vue physique et un point de vue physiologique dont nous nous occuperons successivement.

Nous avons divisé notre travail en trois parties.

Dans la première, après avoir montré rapidement que la cause du son doit être rapportée à un mouvement vibratoire, nous étudions succinctement les propriétés mécaniques de ce genre de mouvement: dans quelques notes placées à la fin de ce travail, nous démontrons par le calcul les diverses propriétés que nous ne faisons d'abord qu'énoncer.

La deuxième partie comprend l'étude des propriétés

du son considéré comme résultat de perceptions variées et les modifications diverses qu'elles peuvent présenter, en même temps que nous indiquons les causes probables auxquelles on doit rapporter les unes et les autres.

L'organe de l'ouïe et son mode de fonctionnement tant physique que physiologique forment le sujet de la troisième partie.

Nous nous sommes efforcé de présenter un ensemble aussi complet que possible sur le sujet que nous avions à traiter; nous avons dû négliger quelques détails de peu d'importance à notre point de vue; nous avons dû passer rapidement et seulement indiquer les expériences et les travaux classiques, en insistant au contraire sur la nature et l'explication de faits intéressants et dont la connaissance et l'importance nous semblent incontestables.

Il nous a paru nécessaire de faire une brève introduction à l'audition, et de donner quelques détails sur la nature et l'importance des modifications physiologiques qui accompagnent l'audition. Nous avons également fait quelques observations sur les modifications physiologiques qui accompagnent l'audition, et nous avons fait une brève introduction à l'audition.

Il nous a paru nécessaire de faire une brève introduction à l'audition, et de donner quelques détails sur la nature et l'importance des modifications physiologiques qui accompagnent l'audition. Nous avons également fait quelques observations sur les modifications physiologiques qui accompagnent l'audition, et nous avons fait une brève introduction à l'audition.

L'AUDITION

PREMIÈRE PARTIE

I

On appelle *audition* l'action d'entendre, la sensation qui nous fait percevoir les sons (1). Le *son* est le résultat de la mise en jeu de l'activité propre du nerf auditif ou acoustique : le son est donc un phénomène intime et subjectif; il n'existe que comme existent les perceptions des autres organes des sens. Le son ne serait pas, s'il n'y avait quelque part des organes auditifs et un nerf acoustique capable de procurer à un cerveau vivant cette sensation, pas plus que la lumière et les couleurs n'auraient d'existence sans un œil et un nerf optique.

Si le son n'a pas d'existence propre, s'il n'est qu'un des modes de manifestation de l'activité de notre système nerveux, les causes qui mettent en jeu cette activité spéciale ont, au contraire, une existence indépendante et sont des phénomènes absolument objectifs qui sont, dans la presque totalité des cas, uniquement dus

(1) Dictionnaire de médecine, par Littré et Robin.

à l'élasticité des corps. On désigne quelquefois ces causes sous la dénomination de son, mais d'une manière abusive; c'est ainsi que l'on dit quel'on fait rendre un son à un instrument, au lieu de dire qu'on le fait vibrer de telle sorte qu'il en résulte pour nous la production d'un son; c'est ainsi que l'on parle de la réflexion, de la réfraction du son, au lieu de s'occuper des changements de direction des ondes condensantes ou dilatantes. Il suffit, du reste, qu'on soit prévenu du sens vrai qu'il faut attribuer à ces expressions pour qu'il n'en résulte aucune difficulté.

Nous le répétons, le nerf auditif seul peut nous faire entendre; les mêmes causes qui, par son intermédiaire, nous font percevoir un son, peuvent agir sur d'autres organes; un sourd peut sentir les vibrations d'une cloche, l'ébranlement produit dans l'air par une forte explosion, il n'entend pas. Si donc la cause du phénomène joue un grand rôle, elle n'est pas suffisante, et pour étudier complètement l'audition, il nous faut poursuivre l'action première jusqu'au nerf auditif même.

Le nerf auditif, comme les autres nerfs sensoriels, n'est susceptible que de donner naissance à une seule sensation, le son, quel que soit le mode d'excitation auquel il est soumis. On connaît les bourdonnements que l'on éprouve dans certains états pathologiques ou qui résultent de l'absorption de quelques agents chimiques (sulfate de quinine, narcotiques, etc.); l'action d'un courant électrique produit des effets analogues, ainsi que Volta l'a démontré en plaçant ses oreilles dans le circuit d'une pile; Ritter a pu même déterminer le son produit. Mais la communication au nerf auditif de mouvements vibratoires est la cause la plus habituelle de la

production d'un son, c'est la seule que nous ayons à étudier; il suffit pour les autres d'indiquer qu'elles sont susceptibles d'agir: c'est à peu près tout ce que l'on en sait.

En raisonnant par analogie avec ce qui existe pour le nerf optique, par exemple, on peut être conduit à admettre que l'activité du nerf auditif ne cesse pas en même temps que la cause qui a mis cette activité en jeu, et qu'il existe une persistance des impressions auditives qui fait durer la sensation plus longtemps que la cause qui la produit.

Jusqu'à présent, aucune expérience n'a été instituée pour mettre en évidence cette propriété du nerf auditif. On cite bien cette remarque, qu'après un voyage de plusieurs jours en diligence, on entend pendant quelques heures après le roulement de la voiture sur le pavé. Mais, dans ces conditions qui ne sont pas entièrement normales, on peut se demander si le bruit provient de la persistance de l'impression ou non pas plutôt de l'état d'irritation dans lequel on se trouve.

La persistance des impressions auditives paraît indirectement prouvée par ce fait que les sensations produites par une série de chocs brusques et réguliers cessent d'être distinctes et se fusionnent en un son continu, sitôt que la succession de ces ébranlements est assez rapide; ainsi que nous le dirons, on peut en conclure que la durée normale de la persistance des impressions auditives est moindre que $1/16$ de seconde.

III Lorsque la cause qui donne naissance au son, quelle

que soit d'ailleurs sa nature, n'éprouve aucune variation pendant un certain temps, la sensation est nette et constitue un son que l'on peut comparer à divers égards à d'autres sons produits dans des conditions différentes; on le qualifie souvent de *son musical* pour indiquer cette possibilité de comparaison.

Si la cause qui produit le son varie, mais que ces variations ne soient pas trop fréquentes et que pendant un certain temps chaque fois cette cause persiste dans un état identique, on percevra une série de sensations nettes et différentes, au commencement de chacune desquelles il devra y avoir une période où deux sensations se superposeront, par suite de la persistance de la première sensation après la cessation de la première cause et la production de la deuxième.

Si les variations de la cause qui produit les sons de viennent très-fréquentes, si la durée pendant laquelle elle reste constante est égale ou plus petite que la durée que nous attribuons à la persistance de l'impression auditive, aucune sensation ne sera nette, puisqu'on éprouvera au même instant divers sons qui n'auront le plus souvent aucun rapport, ou tout au moins dont le rapport changera tout aussitôt: cette succession d'impressions confuses et multiples constitue ce que l'on appelle *bruit*. On conçoit que, pour une pareille sensation dans laquelle rien n'est fixe, aucune comparaison exacte n'est possible avec d'autres sensations plus ou moins analogues.

Si l'on ne tient pas compte de la persistance des sensations auditives, on regardera le bruit comme la succession d'impressions sonores très-diverses et de très-courte durée. On comprend bien encore que l'on ne

puisse pas, en général, établir de comparaison ; mais on se rend moins bien compte de la nature spéciale de la sensation que l'on éprouve, et l'on ne saisit pas pourquoi l'on n'entend pas une série de sons musicaux très-courts se succédant très-rapidement.

Quoiqu'il en soit, il est bien difficile d'établir une distinction absolue entre les sons et les bruits ; et l'on peut le plus souvent comparer ceux-ci entre eux comme les sons, les ranger par ordre d'intensité, de hauteur. Nous verrons même que l'on y peut, le plus souvent, distinguer des sons musicaux assez nets ; c'est même l'existence de ces derniers qui doit rendre possible la comparaison des bruits entre eux : nous aurons à revenir sur cette question.

Nous rappellerons seulement, parmi les expériences qui ont pour but la comparaison des bruits, celle qui consiste à jeter à terre des morceaux de bois sec de dimensions calculées à l'avance, ou à déboucher brusquement des tubes dont les longueurs et les diamètres sont convenablement choisis. Chacun des bruits ainsi produits n'offre aucun caractère musical lorsqu'il est isolé ; mais leur succession permet de les comparer facilement, de les classer. N'est-ce pas enfin par la comparaison des bruits de marteaux frappant l'enclume que, au dire des auteurs anciens, Pythagore aurait été conduit à ses recherches acoustiques et musicales ?

En négligeant les cas exceptionnels que nous avons indiqués, mais que nous n'avons pas à étudier, nous reconnaîtrons pour causes habituelles de la production du son la transmission d'un mouvement vibratoire au nerf auditif : c'est ce que prouveront les considérations qui vont suivre, dans lesquelles nous allons rechercher

Gariel.

2

les conditions que l'on rencontre toujours lorsque l'on entend soit un son, soit un bruit.

Les cordes vibrantes sont une des sources les plus fréquentes de production du son : l'aspect qu'elles présentent (forme d'un fuseau, due à la persistance des impressions lumineuses montrant simultanément la corde dans ses diverses positions successives), la sensation qu'elles occasionnent lorsqu'on les touche, le tracé sinuieux qui se produit lorsque l'on déplace une plaque de verre recouvert de noir de fumée devant une pointe fine qui y est fixée, sont autant de preuves manifestes et irrécusables du mouvement oscillatoire et périodique qu'elles possèdent. Les verges ou ressorts employés dans divers instruments de musique (diapason, anche des harmoniums), présentent les mêmes phénomènes et les preuves sont entièrement identiques.

Les plaques métalliques, cloches, membranes tendues, peuvent produire des sons dans diverses conditions qui toutes correspondent à des mouvements vibratoires ; outre les expériences indiquées plus haut et que l'on peut répéter avec ces corps, on peut mettre hors de doute l'existence de ces vibrations en projetant du sable fin à leur surface pendant qu'ils résonnent ; le sable sera projeté avec des intensités variables suivant les points, et ce mouvement est le résultat des oscillations du corps même.

On peut également mettre en évidence le mouvement vibratoire de l'air qui se produit lorsque, suivant l'expression usuelle, on fait *parler* un tuyau. Il suffit pour cela d'enfoncer à diverses profondeurs dans ce tuyau une membrane de petite dimension tendue sur un cadre et soutenue par quelques fils fins : du sable placé à

l'avance sur cette membrane se met en mouvement lorsque celle-ci se trouve à une hauteur convenable, et met ainsi hors de doute l'existence des vibrations de l'air qui seul peut agiter la membrane de cette façon.

Sans vouloir entrer dans aucun détail à cet égard, nous pouvons rappeler que les sons de la voix humaine proviennent incontestablement des vibrations des cordes vocales mises en mouvement par le passage d'un courant d'air produit pendant l'expiration : aucun doute ne peut exister sur ce point, depuis que l'étude de l'appareil vocal, à l'aide du laryngoscope, a permis de reconnaître les modifications successives éprouvées par les cordes vocales lors de l'émission d'un son.

Pour résumer ce que nous voulions indiquer sur ce sujet dont nous ne parlerons qu'incidentement, nous conclurons que la cause première de la perception d'un son dans les circonstances ordinaires est le mouvement vibratoire d'un corps élastique solide, liquide ou gazeux.

IV

Si la cause du son consiste dans le mouvement vibratoire d'un corps, il faut de toute nécessité que ce mouvement vibratoire puisse être transmis à l'organe de l'ouïe, il faut qu'il existe une série non interrompue de milieux élastiques susceptibles de transmettre les ébranlements périodiques. Cette conséquence peut être vérifiée expérimentalement de la manière suivante :

Un corps sonore, tel qu'un timbre mû par un mouvement d'horlogerie, est placé sur la platine d'une machine pneumatique ; on le recouvre d'une cloche et on

fait le vide aussi complètement que possible; on rend libre le marteau du timbre retenu jusqu'alors par un arrêt à ressort. Le timbre est frappé et vibre; cependant aucun son n'est perçu, car ses vibrations n'ont pu être transmises puisque la cloche est presque entièrement vide de matière pondérable. Pour que l'expérience réussisse, il faut que le timbre repose sur un socle non élastique et non pas directement sur la platine, sans quoi les vibrations seraient transmises du timbre à la platine, puis de celle-ci à l'air et arriveraient ainsi à notre oreille.

L'observation nous conduit facilement aux mêmes résultats, car on sait que l'interposition d'une tapisserie, d'une tenture un peu lourde, suffit pour arrêter presque absolument la propagation des sons à une distance faible.

En outre, quelle que soit la nature du milieu élastique interposé, il est susceptible, en transmettant à l'oreille les vibrations produites en un certain point, de donner naissance à un son. L'air est le véhicule le plus ordinaire de ces mouvements vibratoires, mais ce n'est pas le seul ni même le meilleur; les solides, tels que le bois, le fer, transmettent à de grandes distances le bruit produit en promenant à leur surface une pointe dure; l'eau et les autres liquides sont également susceptibles de transmettre les vibrations; les plongeurs entendent très-bien les bruits auxquels on donne naissance même à de grandes distances: dans les expériences célèbres de Colladon et Sturm, sur le lac de Genève, un son fut transmis par l'eau à une distance de plus de 8,000^m.

La succession de divers milieux élastiques n'est pas

un obstacle à la propagation du son, quoiqu'il en résulte en général un affaiblissement notable de la sensation. Nous n'avons pas besoin d'insister maintenant sur ce fait, qui est démontré par l'observation journalière.

Il résulte donc de ces considérations rapides que la condition nécessaire et suffisante de la production d'un son est la transmission à une oreille saine de vibrations douées de caractères particuliers que nous aurons à rechercher et à étudier; que, par suite, l'étude rationnelle des sons et de l'audition doit être précédée de celles des lois de la production et de la propagation des mouvements vibratoires. Cette dernière étude, qui repose sur la connaissance des lois de l'élasticité, se fait complètement par l'emploi de considérations mathématiques qui, lorsqu'elles sont basées sur des faits nets et bien compris, donnent des résultats qui ont toujours été vérifiés par les recherches expérimentales.

V

Nous avons dit précédemment que la sensation du son a le plus souvent pour cause le mouvement vibratoire d'un corps transmis au nerf auditif, et c'est le seul cas que nous étudions. Sans rechercher actuellement la cause du mouvement vibratoire du corps dit sonore, nous allons nous occuper de la manière dont un ébranlement, ou une série d'ébranlements se propagent.

Étudions d'abord le mode de propagation d'un ébranlement dans un cylindre indéfini rempli d'air et dont les parois sont absolument résistantes: supposons qu'un piston se déplace dans un sens d'une certaine quantité et reste à cette position; dans ce mouvement, si nous ne considérons que la partie du cylindre située du côté où

il se déplace, nous trouverons qu'il a refoulé l'air de proche en proche jusqu'à une certaine distance; la valeur de la condensation dépend entièrement de la nature du mouvement du piston: les molécules de cet air, à leur tour, repousseront celles qui sont devant elles jusqu'à être revenues aux distances qu'elles occupaient précédemment, et à partir de cet instant resteront au repos. Lorsque les molécules qui touchent le piston sont revenues au repos, l'ébranlement se sera propagé plus loin et ce seront d'autres molécules qui éprouveront le maximum de condensation: elles pousseront de même celles qui sont devant elles et reviendront au repos. Le même effet se produira ainsi indéfiniment de telle sorte qu'il y aura constamment le même nombre de molécules ébranlées pour ainsi dire, mais que ce seront des molécules de plus en plus éloignées du piston qui présenteront cet état; on exprime cet effet en disant qu'une *onde condensante* parcourt le cylindre; le phénomène se passe en effet comme si une cause quelconque se déplaçait le long du cylindre, et faisait subir successivement la même condensation aux diverses parties du gaz renfermé dans ce cylindre; en réalité, rien ne se déplace dans toute la longueur du tube, et chaque molécule d'air s'écarte très-peu de sa position d'équilibre.

Supposons actuellement l'air revenu à sa position d'équilibre, et donnons alors au piston un mouvement inverse du précédent; il tendra à faire un vide, et les molécules d'air voisines se précipiteront pour le remplir; il y aura donc à l'instant où le piston s'arrête un écartement des molécules qui se sera propagé à une certaine distance, et une dilatation du gaz dont la valeur dépend de la nature du mouvement du piston;

L'instant suivant, les molécules voisines se seront à leur tour précipitées pour remplir le vide qui tendait à se former, et ce seront ces molécules qui seront plus écartées que ne le comporte l'équilibre, et ainsi de suite indéfiniment, la portion d'air dilatée se trouvant de plus en plus éloignée du piston. On exprime cet effet en disant que le cylindre est parcouru par une *onde dilatante*; de même que précédemment, en réalité, rien ne parcourt le cylindre et chaque molécule se déplace très-peu.

Chaque mouvement du piston en avant donnera naissance à une onde condensante, chaque mouvement en arrière produira une onde dilatante, les deux ondes se déplaçant dans le même sens, vers l'extrémité du cylindre opposée au piston. Nous pourrons produire successivement autant d'ondes que nous voudrons, ondes dilatantes ou condensantes : en particulier, si le piston est animé d'un mouvement de va-et-vient, il se produira successivement des ondes dilatantes et des ondes condensantes.

Le calcul démontre (1), et l'expérience confirme, que dans le cas d'un ébranlement, les distances des molécules ébranlées successivement au piston sont proportionnelles aux temps écoulés depuis le mouvement du piston ; en faisant usage de la notion d'onde, on peut simplifier cet énoncé en disant que l'onde se meut d'un mouvement uniforme : la vitesse de ce mouvement s'appelle *vitesse de propagation* de l'ébranlement : c'est la distance qui sépare du piston la molécule ébranlée pour un temps égal à l'unité.

(1) Voir la note A.

Il est bien clair que, dans le cas qui nous occupe, toutes les tranches d'air subiront exactement les mêmes variations, à cause du diamètre uniforme du cylindre, et parce que nous avons supposé que les parois du cylindre ne pouvaient en aucune façon participer au mouvement du gaz qui y est renfermé.

Étudions maintenant comment se propage un ébranlement dans un milieu élastique et indéfini dans tous les sens. On peut facilement comprendre qu'une condensation ou une dilatation en un point se propage également dans toutes les directions, si bien que l'onde condensante et l'onde dilatante ont l'une et l'autre la forme de surfaces sphériques ayant pour centre le point auquel s'est produit l'ébranlement initial et dont le rayon va constamment en croissant. L'augmentation de grandeur du rayon de ces sphères est proportionnelle au temps, c'est-à-dire que la vitesse de propagation est constante : ce résultat qui n'était pas évident est prouvé par le calcul, et l'expérience a confirmé ces résultats, ainsi qu'il résulte des expériences faites par ordre de l'Académie des sciences en 1738.

Mais, d'autre part, et ce fait est compréhensible, l'ébranlement se modifie en se propageant et diminue à mesure que l'on considère des points plus éloignés; ainsi que nous le dirons, s'il est bien évident que la surface de chaque onde est sphérique lorsque l'ébranlement primitif s'est produit également dans tous les sens, comme dans le cas de l'explosion d'un corps détonant, cela n'est nullement prouvé *a priori*, lorsque cet ébranlement est produit dans une seule direction, comme par exemple lors de la vibration d'un ressort. Mais Poisson a prouvé par le calcul que l'on peut, à partir d'une cer-

taine distance, confondre sans aucune erreur la véritable surface de l'onde avec une sphère.

Enfin, dans tous les cas, on pourra, sans aucune erreur, remplacer un élément de la surface de l'onde par l'élément correspondant du plan tangent, la courbure pouvant être négligée eu égard aux petites dimensions de l'élément considéré.

Si l'on considère des ébranlements successifs, dilatations et condensations, on aura de même une série d'ondes dilatantes et d'ondes condensantes qui se suivront sans se superposer, puisque leur vitesse de propagation est la même.

Nous avons plus spécialement considéré dans ce qui précède l'ébranlement se propageant dans l'air ou dans un gaz ; mais les mêmes conséquences seraient admissibles pour la propagation dans un milieu quelconque, solide ou liquide, pourvu que, compressible et élastique, ses molécules fussent susceptibles de s'écartier ou de se rapprocher momentanément, puis de revenir aux distances correspondantes à leur position d'équilibre.

Dans le cas où les milieux considérés ne sont pas parfaitement élastiques, les conclusions que nous avons indiquées ne présentent pas une rigueur absolue ; mais cependant elles sont applicables dans la plupart des cas.

Enfin, dans les compressions et dilatations, il y a toujours des variations dans l'état calorifique, et une analyse exacte des phénomènes doit tenir compte des nouvelles conditions introduites par ces variations.

Nous devons indiquer, en passant, mais sans insister,

Gariel.

3

que les conséquences auxquelles on est arrivé par la discussion des formules ont été vérifiées par l'expérience.

Les expériences les plus célèbres à ce sujet sont, pour l'air, celles faites par l'Académie des sciences en 1738, et par le Bureau des longitudes en 1822; celles de Bravais et Martins au Faulhorn en 1844; pour l'air et les gaz, il faut encore citer les recherches récentes de M. Regnault; pour les solides, les études de M. Biot sur les tuyaux de l'aqueduc d'Arcueil; enfin pour l'eau, les expériences de Colladon et Sturm que nous rappelions tout à l'heure.

D'autres expériences, dont l'idée est due à D. Bernouilli, et que Dulong et Wertheim ont pu réaliser, permettent d'arriver indirectement à mesurer la vitesse dans les corps élastiques; les résultats convenablement interprétés ont donné sensiblement les mêmes nombres que les mesures directes.

Les diverses expériences que nous venons de rappeler ont aussi conduit à ce résultat que les divers sons se propagent avec la même vitesse; l'observation permet d'arriver aux mêmes conclusions, car on sait que les mélodies ne changent pas de caractère rythmique à quelque distance qu'on les entende, ce qui ne pourrait exister si les divers sons possédaient des vitesses différentes.

Ce résultat a semblé erroné à quelques savants qui, s'appuyant sur ce que le son, comme la lumière, résulte d'un mouvement vibratoire, pensaient que les mêmes conséquences doivent s'appliquer dans les deux cas; et que, de même que les lumières diversement colorées possèdent des vitesses différentes, les sons de

diverses hauteurs ne peuvent se propager de la même manière identiquement. On doit à Cauchy un mémoire intéressant, montrant les causes probables de ces différences importantes (1).

VII

Une comparaison matérielle permet de se rendre un compte assez net de ce mode de propagation ; les ondes que l'on produit dans un liquide par un corps que l'on y plonge brusquement sont assez analogues à ces ondes acoustiques dont nous venons de parler. Ces ondes liquides consistent dans une dépression et une élévation consécutives du niveau, analogues à l'onde condensante et à l'onde dilatante ; elles se déplacent d'un mouvement uniforme, mais les molécules liquides ne sont pas entraînées dans ce mouvement et oscillent verticalement sur place, ainsi que le démontre l'observation de corps légers flottants dans le liquide ; les ondes sont circulaires si elles sont produites dans un bassin d'étendue suffisante, et leur hauteur diminue alors qu'elles s'éloignent du centre d'ébranlement ; dans un canal étroit, l'onde est plane et conserve la même hauteur dans toute la longueur du canal.

Cette comparaison est utile et avantageuse, mais il ne faut pas oublier que les oscillations du liquide sont perpendiculaires à la direction de la propagation, tandis que le mouvement des molécules dans les ondes aériennes se fait dans la direction même de cette propagation.

Ainsi que nous venons de l'indiquer, les ébranlements du corps sonore, condensations ou dilatations,

(1) Comptes-rendus de l'Académie des sciences.

sont transmis, par l'intermédiaire des milieux élastiques, dans le même ordre et avec la même rapidité de succession. Nous pouvons donc remplacer l'étude des ébranlements, qui sont directement transmis au nerf auditif par l'étude des vibrations du corps sonore lui-même. C'est dans la nature de ces vibrations que nous aurons à rechercher la cause première des différents caractères que nous présentent les sons, caractères que nous allons indiquer et qui nous permettent de les distinguer nettement et de les comparer les uns aux autres.

VIII

Quelle que soit l'origine du mouvement vibratoire du corps sonore, d'où émanent les ébranlements qui donneront naissance à un son, ce mouvement vibratoire est une conséquence de l'élasticité et d'un déplacement initial communiqué par une cause quelconque, déplacement qui est toujours très-petit par rapport aux dimensions du corps vibrant; dans ces conditions, on démontre facilement (voir note B) que le mouvement vibratoire est analogue au mouvement oscillatoire d'un pendule et présente les mêmes variations; c'est, suivant l'expression usuelle, un *mouvement pendulaire* dont on peut résumer les caractères principaux de la manière suivante :

Le mouvement est tel que la vitesse, nulle au départ (déplacement initial), croît jusqu'à un maximum qui se manifeste à l'instant où le corps est arrivé à sa position d'équilibre, puis décroît jusqu'à redevenir nulle,

pour une position symétrique de sa position initiale; à partir de cet instant, le mouvement se reproduit exact-

tement semblable en sens contraire, et, ainsi de suite, indéfiniment; l'*amplitude* de l'oscillation est l'espace parcouru entre deux positions successives où la vitesse est nulle; cette amplitude est invariable tant qu'il ne se présente aucune résistance accessoire; enfin la durée de l'oscillation est indépendante de l'amplitude, lorsque cette amplitude est très-petite.

Il résulte de cet énoncé rapide, déduit de la formule même du mouvement, que, lorsqu'un corps élastique vibre, il fait constamment le même nombre de vibrations par unité de temps, lors même que des résistances accessoires, telles que le frottement de l'air viendraient à diminuer progressivement l'amplitude, à la condition toutefois que cette amplitude soit petite par rapport à la dimension du corps.

Le mouvement pendulaire est identique à celui d'un pendule cycloïdal, diffère très-peu du mouvement d'un pendule circulaire; on peut donc s'en rendre facilement compte en imaginant un pendule dont la longueur serait très-courte, et qui, par suite, oscillerait avec une grande rapidité.

Le mouvement pendulaire est le plus simple de ceux que puisse prendre un corps vibrant; on l'obtient en particulier presque absolument pur dans les vibrations du diapason, ainsi qu'on peut s'en rendre compte en étudiant les tracés graphiques que l'on obtient dans ce cas.

IX

Avant d'aborder la question des sons complexes ou des effets produits par l'audition simultanée de plusieurs sons différents, il importe de signaler en passant l'existence du principe de Bernouilli sur la superpo-

sition des petits mouvements (voir note C). On peut faire comprendre comme il suit ce principe :

Supposons un point matériel qui, soumis successivement à l'action de plusieurs forces, subirait certains déplacements différant par la grandeur, le sens et la direction ; si ces diverses causes existent en même temps, le point matériel subira un déplacement qui sera la résultante des mouvements isolés précédemment indiqués. En particulier, si tous ces déplacements ont lieu sur la même direction, le déplacement qui résulte de l'action simultanée des causes est la somme algébrique des déplacements élémentaires, ces déplacements étant affectés des signes + ou —, suivant qu'ils se manifestent dans un sens convenu à l'avance ou dans le sens contraire.

L'air est le plus généralement soumis à des causes diverses qui, agissant isolément, donneraient naissance à des mouvements vibratoires produisant chacun un son différent ; ces mouvements vibratoires coexistent, car l'oreille, dans ce cas, perçoit simultanément divers sons ; nous aurons à faire comprendre comment nous décomposons naturellement un mouvement vibratoire en ses éléments ; il résulte également de cette superposition quelques phénomènes particuliers sur lesquels nous insisterons.

La superposition de mouvements vibratoires est facile à vérifier dans le cas des ondes liquides ; on sait que, lorsque l'on produit simultanément deux ondes circulaires, en projetant des corps en deux points différents ; les deux ondes se développent et se propagent comme si chacune était seule ; et aux points où elles se croisent, l'élévation ou la dépression du liquide est la somme des élévations et des dépressions isolées, ou leur diffé-

rence, s'il s'agit d'un point soumis simultanément à une élévation et une dépression.

Les mêmes circonstances se présentent également dans le cas où il existe trois, quatre ordres différents et davantage, le développement et la propagation de chacune ne s'opposant en rien aux conditions d'existence de toutes les autres.

X

La nature des causes de production du son, jointe au principe de Bernouilli, donne l'explication de certains phénomènes remarquables que l'on ne pouvait expliquer si l'on attribuait une existence matérielle au son, comme on l'a fait depuis longtemps; nous voulons parler des phénomènes d'interférence dans lesquels on peut annuler l'effet d'un son en lui ajoutant un autre son convenablement choisi. D'après ce que nous avons dit, on conçoit que l'on puisse détruire l'effet d'un mouvement vibratoire en lui superposant un autre mouvement vibratoire, dont l'effet serait exactement égal et contraire à celui du premier; cette destruction d'effet peut du reste se manifester d'une manière continue ou simplement par instants. Dans le premier cas, il y aura cessation du son, dans l'autre seulement affaiblissement accompagné de ce que l'on appelle des battements, effets dont nous aurons l'occasion de reparler.

Quelques expériences mettent très-nettement en évidence les phénomènes des interférences; parmi ces expériences très-variées et très-concluantes, nous nous bornerons à citer la suivante:

On place devant l'oreille, et à quelque distance, un diapason qui vibre et, tout en maintenant ses branches verticalement, on le fait tourner autour de son manche;

pendant une rotation complète, l'expérimentateur perçoit des variations constantes dans l'intensité du son; les deux maxima et les deux minima que l'on observe correspondent bien aux positions dans lesquelles les vibrations communiquées par les deux branches de l'instrument sont transmises à l'oreille en s'ajoutant ou en retranchant. Dans un grand nombre d'autres expériences, ce n'est pas seulement un minimum que l'on obtient, mais une annulation complète.

XI

Il n'est nullement nécessaire qu'un mouvement soit pendulaire pour donner naissance à un son; la loi de variation de ce mouvement peut être quelconque, sans qu'il cesse de nous faire percevoir nettement une sensation auditive, pourvu que sa périodicité soit bien régulièrement établie et que la durée d'une période reste comprise entre des limites que l'expérience a déterminées à peu près exactement. On peut même ajouter que ce n'est que dans des conditions assez exceptionnelles que ce mouvement se produit. L'étude des vibrations dans les cordes sonores faite, soit à l'aide de tracés graphiques, soit plutôt, comme l'a indiqué M. Helmholtz, à l'aide du microscope à vibrations de M. Lissajous (1) a conduit à admettre l'existence des mouvements de nature très-divers: ainsi, pour n'en citer qu'un exemple, tandis que la courbe représentative du mouvement pendulaire est une sinusoïde (voir note B), il résulte des

(1) Dans cet appareil on étudie le mouvement d'un point du corps sonore à l'aide de lentilles portées par l'une des branches d'un diapason qui vibre et dont les vibrations sont entretenues à l'aide d'un électro-aimant dans lequel le courant est régulièrement interrompu; de la courbe continue que semble décrire le point observé, on peut déduire la loi véritable de son mouvement.

Les expériences de M. Helmholtz que, dans le cas d'une corde de violon ébranlée par un archet, cette courbe figurative se compose d'un zigzag régulier dont les divers éléments sont des portions rectilignes (1).

Il résulte de cette observation que le nerf auditif peut être affecté par des mouvements périodiques variés ; nous aurons à indiquer les effets qui paraissent dépendre de la loi de ces mouvements et leur mode particulier de perception : il nous suffit pour l'instant d'affirmer la nécessité d'une périodicité dans les vibrations pour obtenir un son ; l'irrégularité de ces mêmes vibrations donnant seulement naissance à la production d'un bruit.

XII

Le son étant la sensation produite par la mise en action du nerf auditif, c'est l'oreille qui doit servir tout d'abord dans les expériences d'acoustiques : une oreille exercée arrive à distinguer des différences très-peu considérables, et qui sont absolument inappréciées lorsque l'on n'en a pas fait l'objet de recherches particulières. Nous devons signaler ce fait assez important dans des expériences de cette nature, c'est que, en prêtant une attention spéciale, en produisant préalablement une certaine note, on peut beaucoup plus facilement la distinguer parmi plusieurs autres, et lors même que sa faible intensité l'aurait fait échapper à une première investigation.

On peut, dans certains cas, arriver plus facilement à l'étude complète d'un son ou d'un bruit quelconque par l'emploi d'appareils spéciaux dus à M. Helmholtz, les

(1) Helmholtz. Théorie physiologique de la musique, traduit par G. Guéroult.

résonnateurs. Ces appareils, dont nous donnerons plus loin la description et le mode d'action sont tels, que chacun permet la perception d'un son déterminé qu'il renforce, tandis qu'il éteint presque absolument tous les autres : en ayant une série de résonnateurs convenablement gradués, on pourra arriver rapidement à étudier complètement les phénomènes auditifs.

On ne se borne pas maintenant à l'étude subjective des sensations auditives, et l'on a pu arriver à construire des appareils qui, n'agissant en aucune façon sur l'organe de l'ouïe, permettent de déterminer par la *vue* la sensation que notre oreille nous aurait fait éprouver si elle s'était trouvée dans les mêmes conditions que cet appareil. En un mot, on étudie non plus le *son*, mais les mouvements vibratoires mêmes qui lui donnent naissance. Pour que cette étude conduise au même résultat que l'audition directe, il faut que l'on se soit parfaitement assuré par avance des relations qui existent entre les sensations et les mouvements vibratoires correspondants dans un certain nombre de cas simples et bien déterminés. Actuellement cette étude est faite assez complètement pour que l'on puisse remplacer l'étude subjective de l'audition par l'étude directe des mouvements vibratoires. Parmi les appareils que l'on peut employer, les uns comme l'appareil à flammes manométriques de M. Koenig, ne donnent que des impressions visuelles fugitives ; les autres donnent des tracés graphiques que l'on peut conserver et étudier à loisir ; parmi ceux-ci nous indiquerons divers appareils basés sur la méthode indiquée par Duhamel, le tracé étant donné par le corps sonore lui-même ; dans le phonautographe de MM. Scott et Koenig, au contraire, l'appareil indique

les mouvements vibratoires qui lui sont communiqués comme ils seraient communiqués à l'oreille même.

On peut affirmer que ces procédés détournés d'étudier les sensations sont avantageux en ce qu'ils éliminent des causes fréquentes d'erreur ; ces méthodes indiquent d'autre part une connaissance complète des conditions et des résultats, et ne peuvent être employées que dans une branche arrivée à un haut degré de développement : c'est le cas pour l'acoustique, pour laquelle les théories mécaniques et mathématiques ont donné une concordance absolue avec les phénomènes physiques observés.

Malgré cela nous ne voulons point prétendre qu'il faille actuellement renoncer à l'emploi de l'oreille pour l'étude des sensations auditives. Il faut, au contraire, de toute nécessité, y recourir chaque fois qu'il se présente un phénomène acoustique nouveau ou qui se produit dans des conditions qui ne sont pas toutes absolument déterminées. C'est l'oreille enfin qui juge en dernier ressort et dont les décisions doivent rester absolument incontestées. Le physicien et le physiologiste doivent tenter d'expliquer les diverses sensations, mais ils ne peuvent prétendre déterminer les sensations correspondant à de nouvelles conditions non encore étudiées.

En reconnaissant l'oreille comme devant en somme décider sur toutes les sensations auditives, nous ne pensons nullement dire que les sensations qu'un même corps sonore prouve à diverses personnes soient les mêmes ; c'est là une question qui ne peut être résolue, et qui n'a, au reste, aucune importance ; il suffit que pour chaque expérimentateur, les mêmes conditions produisent toujours la même sensation, et c'est ce qui

semble vrai; il faudrait en outre qu'une même sensation ne pût correspondre qu'à une même série de conditions: à cet égard, l'oreille semble encore être un bon instrument d'investigation, meilleur même que n'est l'œil, car il n'existe aucune observation qui permette de supposer que l'organe de l'ouïe puisse être affecté d'une infirmité analogue au *daltonisme* ou *achromatopsie*.

la propriété qui nous fait faire des distinctions point à insister, ont invariablyement conduites le même sens des modifications corporelles.

DEUXIEME PARTIE

Après avoir indiqué d'une manière rapide les propriétés générales des sons dont l'étude n'offre que peu d'importance pour le sujet que nous avons à traiter, nous devons entrer dans de plus grands détails sur les phénomènes qui intéressent particulièrement l'audition, et chercher à nous rendre un compte exact de leurs conditions d'existence et des effets divers qu'ils peuvent produire.

Un son présente trois caractères irréductibles entre eux et suffisant, même séparément, lorsqu'ils diffèrent, pour le distinguer de tous les autres entendus simultanément ou successivement.

Ces caractères, que l'on ne peut définir autrement qu'en faisant appel à la mémoire des sensations éprouvées dans des conditions déterminées, et qui ne seraient pas compréhensibles si l'on n'avait effectué, même involontairement, la comparaison de plusieurs sons, peuvent être classés comme il suit :

La *hauteur* d'un son est la propriété qui nous conduit à dire qu'il est *grave* ou *aigu*;

L'*intensité* d'un son est la propriété qui nous le fait paraître *fort* ou *faible*;

Enfin deux sons, que nous reconnaissons manifestement avoir même hauteur et même intensité, peuvent nous sembler fort différents, par exemple, lorsqu'ils sont produits par deux instruments dissemblables, etc.;

la propriété qui nous les fait alors distinguer constitue le *timbre* du son.

L'étude des mouvements vibratoires des corps sonores, comparés aux sensations que nous éprouvons dans diverses circonstances, nous permettra de déterminer, plus ou moins complétement, les conditions que nous devons considérer comme causes de chacune de ces propriétés particulières.

Tout mouvement vibratoire qui produit un son étant régulièrement périodique, le nombre des vibrations est constant pour un même intervalle de temps. C'est à ce nombre de vibrations, ou si l'on veut à la durée de chacune d'elles qu'il faut rapporter la cause de la propriété que nous avons signalée sous le nom de *hauteur*. Deux corps sonores quelconques donnent naissance à des sons ayant même hauteur ou des hauteurs différentes, suivant qu'ils font ou non le même nombre de vibrations par seconde, et le son est d'autant plus aigu que le nombre des vibrations effectuées en un temps donné est plus grand. On peut compter ces vibrations de plusieurs manières : soit à l'aide de la sirène de Seebeck ou de Cagniard-Latour, soit par la comparaison des nombres de vibrations effectuées par des verges ou des cordes assez longues pour que leurs vibrations soient distinctes à la vue, comme l'indiquent Chladni et le P. Mersenne ; enfin l'étude des tracés graphiques, comme l'a indiqué M. Duhamel, peut encore être d'une grande utilité.

Ces diverses méthodes, sur lesquelles nous n'avons

point à insister, ont invariablement conduit à cette conclusion, que la hauteur dépend du nombre de vibrations, et que deux sons ont même hauteur ou qu'ils sont à l'unisson lorsque les nombres de vibrations correspondants sont les mêmes.

L'échelle des sons est absolument continue entre deux limites extrêmes, puisque l'on peut augmenter d'aussi peu qu'on le veut un nombre de vibrations; mais, parmi tous ces sons, il en est certains auxquels l'oreille s'arrête de préférence; si l'on considère toutes les notes à partir d'un son déterminé, on arrivera à une note qui nous reproduira une sensation très-analogue à celle que nous avait fait ressentir le son initial; cette note est dite l'*octave* de la première: la ressemblance est telle que des personnes non prévenues peuvent ne point saisir la différence et que, même pour des oreilles exercées, il peut se présenter de sérieuses difficultés si les sons ne présentent pas le même timbre.

On a reconnu que, pour deux notes à l'octave, les nombres de vibrations sont toujours dans le rapport de 1 à 2, quelle que soit la hauteur absolue de ces notes.

Il existe d'autres notes auxquelles l'oreille s'arrête presque aussi naturellement; ce sont celles que l'on désigne sous le nom de *quarte* et de *grinte* du son fondamental; cependant il y a une différence de sensation que l'on n'éprouve nullement pour l'octave. Ces notes correspondent respectivement à des nombres de vibrations qui sont dans le rapport de 4/3 et de 3/2 avec le nombre de vibrations du son initial.

A ces sons viennent s'ajouter, pour former l'échelle des notes employée en musique et connue sous le nom de gamme, d'autres sons qui n'ont pas avec le son

initial une même parenté pour ainsi dire, et à l'exception de la tierce majeure (dont le nombre de vibrations est de 5/4), il n'y a peut-être pas de raisons qui rendent un compte exact de l'adoption de telle ou telle échelle; il y a, dans l'effet produit par l'emploi de l'une ou l'autre gamme une question d'éducation et d'habitude de l'organe. Aussi n'insisterons-nous pas sur ces gammes, cette question ne nous semble pas résolue et nous entraînerait beaucoup trop loin.

On conçoit que l'emploi de ces intervalles, que l'oreille apprécie très exactement, permet de mesurer indirectement le nombre de vibrations qui correspondent à un son donné, si par exemple ce son est l'octave, la quinte ou la quarte d'un autre son dont on ait préalablement déterminé le nombre de vibrations.

Dans ces comparaisons, après l'unisson, l'octave est l'intervalle que l'oreille apprécie le mieux, c'est-à-dire celui pour la détermination exacte duquel on éprouve la plus grande facilité.

L'expérience montre que, dans toute la série des sons, aucun n'échappe, tous sont entendus quelque rapprochés qu'on les exécute, et quoique ne semblant pas même distincts les uns des autres; mais cette possibilité de l'audition n'existe que dans de certaines limites, et nous cessons de percevoir un son aussi bien lorsque les vibrations sont trop rapides que lorsqu'elles sont trop lentes: ces limites ne doivent avoir rien de fixe et tout porte à croire qu'elles dépendent de l'organisation propre de chaque observateur et certainement aussi de l'intensité des sons.

Sauveur avait admis qu'un son ne pouvait être entendu s'il ne correspondait à 25 vibrations par seconde au moins; Savart donna un nombre moindre encore comme résultant de ses expériences, 16 vibrations par seconde; M. Despretz trouva en discutant ces résultats seulement 32 vibrations et M. Helmholtz par une autre méthode, 60 vibrations environ.

S'il se produit des vibrations en nombre moindre que la limite des sons graves, l'oreille perçoit non plus un son, mais une série de choques ou d'explosions discontinues; de ce fait, et en admettant le nombre de Savart, on peut conclure que la persistance des impressions auditives est de moins de 1/16 de seconde. Le son n'est continu pour nous que parce que les actions successives provenant des vibrations se fusionnent en une sensation continue: ce fusionnement des sensations n'a pas lieu pour 16 vibrations par seconde, ce qui existerait incontestablement si la persistance atteignait 1/16 de seconde, car alors une nouvelle sensation serait perçue avant la cessation de la précédente.

La limite supérieure des sons aigus n'est pas plus nettement déterminée que la limite inférieure des sons graves. Savart avait indiqué d'abord 33,000, puis 48,000 vibrations par seconde, comme correspondant aux sons les plus aigus que l'on peut percevoir. MM. Despretz et Marloye ont cru pouvoir reculer cette limite jusqu'à 73,000 vibrations par l'emploi de très-petits diapasons: M. Koenig a trouvé un nombre à peu près égal à celui indiqué par Savart, 40,000 vibrations.

Mais, nous le répétons, ces limites ne doivent avoir rien d'absolu, et Wollaston l'a vérifié par diverses observations. Quoi qu'il en soit, on doit limiter les sons mu-

Gariel.

3

sieaux à un intervalle notablement moindre que celui que donneraient les chiffres précédents, et l'on peut prendre pour limites des sons habituellement entendus d'une part 80 vibrations, de l'autre 9,000.

Il nous suffira de dire en outre que le la_3 donné par diapason normal français exécute 870 vibrations simples par seconde d'après les déterminations de M. Lissajous.

IV

Pour nous rendre compte exactement des phénomènes de l'audition, il est indispensable que nous ayons indiqué d'une manière rapide les lois qui président aux mouvements vibratoires des corps sonores : nous nous occuperons tout d'abord des cordes vibrantes ; on désigne sous ce nom des solides élastiques, dont deux des dimensions sont très-petites par rapport à la troisième et qui sont fixées invariablement à leurs extrémités. Un semblable corps est susceptible de deux sortes de vibrations, *vibrations longitudinales*, dans lesquelles la trajectoire décrite par chaque molécule est dans la direction même de la corde, et *vibrations transversales*, dans lesquelles cette trajectoire est normale à la corde ; nous ne nous occuperons que de ces dernières, nous bornant à rappeler que les vibrations longitudinales correspondent à des sons beaucoup plus élevés que les autres, et que, fort probablement, leur existence n'est pas sans présenter un certain intérêt encore peu connu dans la question des sons complexes du timbre.

La recherche du nombre de vibrations correspondant à un son produit par une corde s'obtient en accordant à l'unisson une sirène dont le compteur indiquera le

nombre cherché pour le temps qu'aura duré l'expérience ; on fait varier les conditions diverses qui peuvent influer, et l'on se sert avantageusement à cet effet de l'appareil appelé *sonomètre*. Des expériences multiples qui ont été faites et qui on donné des résultats entièrement conformes à ceux que le calcul indique, on conclut que le nombre des vibrations transversales d'une corde correspondant au son le plus grave qu'elle puisse rendre dépendent :
1° de sa longueur ;
2° de son diamètre ;
3° de sa densité ;
4° du poids qui la tend.
Ce nombre est déterminé par la relation

$$n = \frac{1}{rl} \sqrt{\frac{gP}{\pi d}}$$

dans laquelle n représente le nombre de vibrations effectuées en une seconde, r le rayon de la corde, l sa longueur, d la densité de la matière qui la constitue, et P le poids qui la tend ; les lettres g et π ont leur signification usuelle.

Nous n'avons nullement besoin d'insister sur ces lois en général ; il nous suffira d'énoncer intégralement la loi relative à la longueur.

Les nombres de vibrations exécutées par une corde sont inversement proportionnels à la longueur. Il en résulte, par exemple, que les sons produits par une corde qui vibre en entier ou que l'on réduit à moitié sont à l'octave l'un de l'autre, puisque leurs nombres de vibrations sont dans le rapport de 1 à 2.

Une corde est susceptible de vibrer transversalement de plusieurs manières différentes : ainsi, un chevalet

étant placé au tiers d'une corde tendue sur un sonomètre, si l'on ébranle directement le plus grand segment de cette corde, il vibrera dans sa totalité : mais, si l'on ébranle seulement le petit segment, en même temps que celui-ci vibrera en entier, le grand segment se partagera en deux parties vibrants séparément de sens contraire et séparées par un point immobile : cette portion de corde fera donc le même effet que deux cordes distinctes et égales chacune à la moitié de sa longueur. Le point immobile a reçu le nom de *nœud* ; à égale distance de deux nœuds se trouve une partie dont les mouvements ont le plus d'amplitude et que l'on appelle *ventre*. On peut produire un effet analogue en touchant même très-légèrement le point où l'on veut obtenir un nœud et ébranlant la corde en l'un des points qui sera occupé par un ventre. Dans ces conditions, on arrive à produire facilement ces vibrations partielles toutes les fois que le nœud correspondra à une partie aliquote de la corde ; le résultat s'obtient, en général, d'autant plus facilement que le nombre de parties dans lesquelles la corde est divisée est moins considérable.

Les modes de vibration que l'on peut ainsi communiquer à la corde correspondent par suite à sa longueur totale l et à des longueurs qui sont successivement $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, etc. Les nombres de vibrations sont donc les divers multiples par 2, 3, 4, etc., du nombre de vibrations correspondant au son de la corde entière. Ces sons, qui deviennent ainsi de plus en plus aigus, ont reçu le nom d'*harmoniques* du son fondamental : le 1^{er} harmonique est celui qui correspond à la division de la corde en deux parties égales ; le 2^e est donné par la division en trois parties et ainsi de suite. Ces différents sons portent col-

lectivement le nom de *sons partiels*; le premier son partiel (ou son fondamental) est donné par la corde vibrant dans sa totalité; le 2^e, le 3^e, etc., sont donnés par les divisions en deux, trois, etc., parties égales. Cette dénomination nous semble plus rationnelle et plus avantageuse.

Connaissant l'échelle de la gamme et les rapports correspondants, on peut trouver facilement le nom des différents sons partiels. Si nous appelons *ut*, le son fondamental, *n* le nombre de vibrations correspondant, nous aurons le tableau suivant :

Ordre du son partiel :	1	2	3	4	5	6	7	8
Nombre de vibrations :	n	$2n$	$3n$	$4n$	$5n$	$6n$	$7n$	$8n$
Nom de la note :	<i>ut₁</i>	<i>ut₂</i>	<i>sol₂</i>	<i>ut₃</i>	<i>mi₃</i>	<i>sol₃</i>	—	<i>ut₄</i>

les indices marquant, suivant l'habitude, l'ordre d'octaves de plus en plus élevées. On peut remarquer que ces sons partiels, à l'exception du 7^e qui n'est pas même une note de la gamme usuelle, sont précisément ceux que nous avons indiqués comme étant les plus naturels à l'oreille.

Les cordes et les verges ne sont pas les seuls corps solides capables de vibrer; les plaques jouissent également de cette propriété et ont été spécialement étudiées.

On appelle *plaque* un corps solide élastique dont une seule dimension est très-petite par rapport aux deux autres. Dans leurs vibrations ces plaques se séparent en parties ou *concavitations*, se mouvant à chaque instant dans des sens opposés et séparées par une ligne dite *nodale* qui reste au repos. L'étude de ces lignes a été faite d'abord par Chladni, qui les mettait en évidence en projetant sur la

plaqué du sable qui, chassé des parties vibrantes, se réunissait sur les points en repos. Savart reprit ces expériences et les varia ; mais, de ces recherches et d'autres encore, il ne résulta aucun fait important que nous ayons à signaler et qui ait un intérêt quelconque au point de vue auquel nous sommes placés.

Les membranes flexibles, tendues avec plus ou moins de rigidité sur des cadres solides, sont susceptibles de vibrer lorsqu'on les ébranle soit directement, soit par l'intermédiaire de ce cadre. Elles se divisent également en concréteries, mais il résulte des expériences de Savart, que celles-ci varient rapidement. L'observation montre, en effet, qu'elles sont plus susceptibles de produire des bruits que des sons ; quoique le tambour et les timbales employées dans les orchestres aient un son défini et puissent s'accorder, ce son cependant se rapproche très-considerablement d'un bruit et ne présente réellement un caractère musical que par la succession d'autres bruits de même nature.

Les membranes présentent peu d'intérêt au point de vue du son qu'on peut leur faire produire directement ; nous aurons, au contraire, l'occasion d'y revenir assez longuement lorsque nous parlerons des vibrations communiquées.

L'air, ou d'une manière plus générale les fluides (gaz ou liquides) contenus dans un tuyau, sont susceptibles de communiquer au milieu dans lequel ils sont plongés des vibrations dans certaines conditions déterminées que nous allons indiquer.

Considérons un ébranlement provoqué à l'une des ex-

trémités d'un tuyau et donnant naissance à une onde aérienne : ainsi que nous l'avons dit, cette onde se propagera de manière à mettre successivement dans le même état de condensation ou de dilatation toutes les molécules ; mais ici, le tuyau est limité et l'onde arrivera à l'extrémité du tuyau après un certain temps. Deux cas peuvent alors se présenter : 1^o le tuyau est fermé par une paroi non susceptible d'être ébranlée ; 2^o il s'ouvre librement à l'air. Dans les deux cas, il se produira une autre onde marchant en sens contraire de la précédente ; seulement la réflexion dans le tuyau ouvert aura transformé l'onde dilatante en onde condensante ou réciprocement, tandis que par la réflexion sur la paroi solide, l'onde rétrograde sera de même nature que l'onde directe. Un phénomène entièrement analogue à ce dernier se produit dans un espace indéfini et donne alors naissance à l'écho dont nous n'avons point autrement à nous occuper.

Si l'on communique à l'air une série d'ébranlements successifs, chaque onde se réfléchira et en rétrogradant rencontrera les ondes directes qui viennent à cet instant : ces ondes, qui proviennent, en somme, d'une même source et dont les directions sont opposées se trouvent dans les conditions les plus convenables pour interférer, et c'est en effet ce qui se produit. Une étude analytique ou géométrique de la question montre qu'en certains points ces ondes directes et rétrogrades se détruisent constamment l'une l'autre ; l'air qui se trouve en ces points ne subit ni condensation ni dilatation ; ce sont des *ventres* ; à égale distance entre deux nœuds, on trouve au contraire des points qui éprouvent les plus grandes condensations et dilatations successives, ce

Garnier.

sont les nœuds ; on reconnaît également que deux nœuds ou deux ventres consécutifs sont séparés par un intervalle égal à une demi-longueur d'onde ; entre un nœud et le ventre suivant il y a une distance égale à un quart de longueur d'onde.

Il existe toujours un ventre à l'extrémité où l'on fait parler le tuyau ; à l'autre extrémité, c'est un ventre si le tuyau est ouvert, un nœud si le tuyau est fermé. La longueur d'onde ayant une relation avec la distance des nœuds, on voit que le son sera d'autant plus grave qu'il y aura moins de nœuds.

I. Dans un tuyau fermé, les extrémités correspondent l'une à un ventre, l'autre à un nœud. Il peut ne s'en présenter aucun autre dans l'intervalle ; dans ce cas, la longueur d'onde du son correspondant est égale à quatre fois la longueur du tuyau ; s'il se forme des nœuds, il pourra s'en présenter un nombre quelconque, 2, 3, 4, etc., la distance de chaque nœud au plus voisin serait respectivement $1/2$, $1/3$, $1/4$ de ce qu'elle était précédemment. Les nombres de vibrations seront au contraire deux, trois, quatre fois ce qu'elles étaient. On voit que le tuyau présente la même série de sons partiels que les cordes vibrantes.

II. Dans les tuyaux ouverts, il y a un ventre à chaque extrémité, et par suite un nœud au moins au milieu et s'il y en a plus d'un il y en aura un nombre impair 3, 5, 7, etc. Les ondes correspondantes auront, pour le son le plus grave, le double de la longueur du tuyau et pour les suivants des longueurs qui seront respectivement $1/3$, $1/5$, $1/7$ de celles-ci. Les nombres de vibrations seront alors trois, cinq, sept fois plus considérables.

Un tuyau ouvert ne peut donc donner que les sons partiellement impairs du son fondamental.

Il faut bien remarquer que la vibration de l'air dans un tuyau se fait longitudinalement et non transversalement comme dans les cordes et les plaques.

VII

L'intensité est très-probablement mesurée par la puissance vive (demi-force vive) communiquée au nerf acoustique lors de l'audition. Outre que cette puissance vive sert assez généralement de mesure dans les phénomènes mécaniques, l'observation des variations que présente cette intensité dans diverses circonstances conduit à l'admettre également dans ce cas, ainsi que nous allons le montrer. Nous devons signaler que les recherches à cet égard ne sont pas absolument rigoureuses et significatives, car il est très-difficile non pas même de comparer des intensités différentes, mais encore d'affirmer l'égalité d'intensité de deux sons, même identiques à tous les égards, à plus forte raison s'ils ont quelque autre caractère différent. Pour ce genre de mesure, l'oreille, souvent si supérieure à l'œil dans ces appréciations, lui est bien inférieure ; cela ne tient probablement pas à un manque de sensibilité, mais à ce que l'œil perçoit simultanément les deux impressions à comparer, tandis que l'oreille ne peut nous les transmettre que successivement si nous voulons les distinguer.

D'après quelques observations et quelques expériences, l'intensité d'un son émis par un même corps semble diminuer en raison inverse du carré de la distance, lorsque la propagation se fait à l'air libre, dans toutes les directions ; c'est aussi suivant cette loi que varierait la

puissance vive communiquée à un même corps; puisque aucune force n'agit après l'ébranlement produit au centre, la puissance vive totale ne peut varier; et, comme la surface sphérique à laquelle elle se communique augmente proportionnellement au carré du rayon pour un même élément, la puissance vive variera en raison inverse de cette surface ou inversement au carré du rayon.

Dans un cylindre indéfini, l'intensité du son ne varie que très-peu, ainsi que cela peut s'observer dans les tuyaux acoustiques que l'on emploie pour transmettre des ordres à d'assez grandes distances et comme Biot l'a reconnu à l'aqueduc d'Arcueil; dans ce cas en effet, la puissance vive initiale qui ne peut varier se répartit constamment sur la même surface et par suite reste la même aussi sur chaque élément.

Pour une même distance de l'oreille au corps sonore, l'intensité augmente avec l'amplitude des vibrations de celui-ci, ainsi que cela est manifeste lorsque l'on écarte une corde de sa position d'équilibre; or dans ce cas, la vitesse du mouvement vibratoire atteint un maximum qui varie avec cette amplitude, il est donc naturel que la puissance vive ($1/2 mv^2$) augmente également; on arrive à un résultat analogue en variant la vitesse du courant d'air qui fait parler un tuyau.

Enfin l'intensité d'un son varie avec la densité du gaz dans lequel il est produit, ce qui est encore conforme à l'indication que nous avons donnée, puisque la puissance vive varie avec la masse du corps qui elle-même dépend de la densité. Les expériences à cet égard sont variées: les premiers, Saussure au Mont-Blanc et La Condamine à Quito ont signalé l'affaiblissement du bruit d'un canon ou d'un pistolet lorsque l'on s'élève dans l'atmosphère: cette observation a été répétée de-

puis fréquemment dans les ascensions aérostatiques. D'autre part, Zanetti a observé un affaiblissement du son dans un vase ouvert où l'air était échauffé, tandis que Rœbuck se plaçant dans des grottes ou galeries qui servent de réservoir d'air comprimé dans les forges de Devon reconnut que le son de sa voix était considérablement augmenté lorsque les soufflets étaient en action. En opérant sur des gaz de nature différente, Priestley et plus tard Perolle reconnurent que l'intensité du son diminue en même temps que la densité, et enfin Odier et Pilâtre du Rozier observèrent que lorsque l'on a respiré du gaz hydrogène le son de la voix devient grêle. A ces expériences, on peut encore joindre les effets qui se sont produits dans les fondations tubulaires de divers ponts où les ouvriers travaillaient dans une atmosphère d'air comprimé et qui sont conformes à celle de Rœbuck.

Enfin le son se produit avec une grande intensité dans les liquides et les solides ainsi qu'il résulte de diverses expériences citées précédemment, ce qui est encore conforme à cette idée que la puissance vive mesure l'intensité du son.

VIII

Le son se propage non-seulement dans le milieu élastique dans lequel il a pris naissance, mais encore dans tous les autres milieux qui sont en contact avec le premier : seulement ce passage ne s'effectue pas en général sans une notable variation d'intensité ; cette variation, qui dépend des diverses circonstances dans lesquelles se produit le phénomène, présente un intérêt considérable au point de vue de l'organe de l'ouïe et des conditions dans lesquelles il entre en jeu ; l'étude de cette question dont l'importance physiologique ne

peut être mise en doute a été faite d'abord par Savart, puis par J. Muller (1).

Ce dernier a tout spécialement cherché à reproduire les conditions mêmes dans lesquelles fonctionne l'oreille ou plutôt ses diverses parties et à montrer que ces conditions sont précisément les plus favorables, comme nous le dirons.

Les diverses expériences ont été faites en produisant un son à l'aide d'un sifflet et en cherchant l'impression perçue par le nerf auditif suivant que l'oreille se trouvait directement ou indirectement en communication avec le milieu dans lequel le mouvement vibratoire prend naissance ; suivant que ce mouvement vibratoire arrive par l'intermédiaire de gaz, de liquides ou de solides : les diverses modifications à apporter sont faciles à concevoir, et nous ne nous y arrêterons pas, nous bornant à signaler les résultats sur lesquels nous aurons principalement à nous appuyer plus tard : les expériences de J. Muller sont plus variées, elles ont rapport à l'audition dans la série animale qui comporte les conditions les plus diverses.

Les points sur lesquels il nous semble plus important d'insister sont les suivants :

I. Les ondes sonores de l'air se transmettent difficilement à l'eau et avec bien plus de difficulté qu'elles ne marchent dans l'air, mais elles se communiquent très-faiblement à ce liquide par l'intermédiaire d'une membrane tendue.

II. Les ondes sonores qui se propagent dans l'eau subissent une réflexion partielle de la part des parois des corps solides.

(1) Manuel de physiologie, par J. Muller, 1845. — Traduit par A. J.-L.ourdan, t. II.

III. De minces membranes conduisent le son dans l'eau sans affaiblissement, qu'elles soient ou non tendues.

IV. Un petit corps solide, adapté sur une fenêtre par un rebord membraneux qui lui permet une certaine mobilité transmet les ondes sonores de l'air à l'eau beaucoup mieux que d'autres parties solides. Mais la transmission devient plus énergique encore lorsque le conducteur solide qui bouche la fenêtre est fixé au milieu d'une membrane tendue que l'air baigne des deux côtés.

V. Une petite membrane conduit moins bien le son quand elle est fortement tendue que quand elle l'est peu.

IX

Un mouvement vibratoire peut se communiquer, comme nous venons de le dire, dans un milieu élastique; mais, s'il se trouve sur son passage certains corps susceptibles eux-mêmes d'entrer en vibration, de nouveaux phénomènes peuvent se produire: ce sont les phénomènes de vibrations par influence et de résonnance.

Pour saisir nettement la manière dont ces phénomènes prennent naissance, il faut se rappeler qu'une corde (ou une masse d'air limitée) ne peut pas vibrer d'une façon quelconque et que, quel que soit son mode d'ébranlement, il ne peut s'établir qu'un mouvement compatible avec les conditions physiques et mécaniques de la corde ou de la masse d'air. De même qu'un pendule de longueur donnée prendra toujours le même mouvement de quelque manière qu'on vienne à le déranger de sa position d'équilibre, de même une corde ne peut prendre qu'un mouvement vibratoire de totalité ou correspondant à l'une de ses parties aliquotes:

de même pour un tuyau sonore. Une corde, et tout ce qui suit s'appliquerait également à une masse d'air limitée, ne peut donc aucunement se mettre à vibrer si elle ne reçoit des ébranlements dont la durée n'est pas celle même des vibrations dont elle est susceptible; car, à chaque instant, le nouvel ébranlement viendrait détruire en totalité ou en partie le mouvement que la corde aurait pris à la suite du premier ébranlement. Aucun effet ne se produira donc.

Supposons, au contraire, que les ébranlements aient exactement la même périodicité que l'un des mouvements vibratoires dont la corde est susceptible. Le premier ébranlement communiqué à la corde met celle-ci en mouvement avec plus ou moins d'intensité; lorsque le second ébranlement arrivera, il retrouvera la corde dans les mêmes conditions que le premier et son effet ajoutera une nouvelle vitesse à celle que possède la corde; il en sera de même du troisième et des suivants, puisque la période de l'ébranlement et celle de la vibration sont identiques; le mouvement vibratoire augmentera donc d'amplitude à chaque fois, jusqu'à ce que l'impulsion communiquée par un ébranlement soit égale aux résistances que la corde a à vaincre dans le même temps. Quelque petits que soient ces ébranlements, ils peuvent finir par donner au mouvement une amplitude assez considérable; n'est-ce pas, pour citer un exemple qui permet de se rendre compte de cet effet, par une série d'impulsions faibles mais rythmées que l'on parvient à mettre en branle les plus grosses cloches, à la condition que le rythme de ces ébranlements corresponde précisément à la durée des oscillations de la cloche; d'autres ébranlements plus considérables mais irréguliers ont

invariablement pour effet de réduire celle-ci au repos.

Considérons donc deux cordes à l'unisson, c'est-à-dire telles qu'elles fassent le même nombre de vibrations par seconde et plaçons-les à quelque distance. Si nous ébranlons l'une de ces cordes, l'autre étant en repos, les vibrations de la première se communiqueront à l'air et certaines molécules d'air viendront régulièrement ébranler la seconde corde : les premiers choques ne lui communiqueront qu'un bien faible mouvement ; mais, comme ce mouvement a la même période que celui communiqué à l'air par l'autre corde, les ébranlements successifs ajouteront constamment leurs effets et finiront par donner à la seconde corde un mouvement ayant une amplitude assez grande pour que, transmis à notre oreille, il nous fasse percevoir un son.

Les expériences sont, à cet égard, faciles à exécuter et concluantes : on sait que bien souvent dans une chambre les carreaux ou tout autre objet se mettent à vibrer lorsqu'en élevant la voix on produit un certain son particulier ; si l'on fait vibrer la corde d'un violon, par exemple, à côté d'un autre violon accordé à l'unisson ou devant un piano dans lequel on a levé le pédale des étouffoirs, certaines cordes de ces instruments vibrent aussitôt en renforçant le premier son et en le prolongeant lorsqu'on vient à l'éteindre.

Le même effet peut se manifester en produisant un son à quelque distance d'un vase creux de dimensions telles qu'il donnerait lui-même ce son : sans parler de l'expérience classique du renforcement du son par ce procédé, nous rappellerons que, au dire de Vitruve, les anciens plaçaient dans les théâtres de grands vases d'airain ayant pour effet de renforcer la voix des ac-

teurs. La communication des vibrations peut donner à l'air de ces capacités un mouvement très-sensible, lors même qu'aucun son ne se produit : dans une salle de théâtre et même à une grande distance de l'orchestre, on peut, pour certaines notes, sentir vibrer sous les doigts le fond d'un chapeau, tandis qu'il reste immobile pour tous les autres sons. On peut même, paraît-il, briser un vase de verre mince en produisant avec force le son même qui correspond à sa capacité. « On m'a communiqué, dit Chladni (1), un endroit du Talmud (Bawa Kama, 48), qui contient des discussions sur l'indemnité qu'on peut exiger quand un vase est rompu par la voix d'un animal domestique, ce qui donne lieu de présumer que si un cas semblable n'était jamais arrivé, on n'aurait pas conçue l'idée de s'occuper de discussions sur cet objet. » Ce fait est également rapporté par quelques auteurs : on le trouve cité dans Morhof (2) et dans Bartoli (3).

La communication du mouvement vibratoire d'un corps sonore à un autre peut donc se faire par l'air ; ce point est important à signaler, et nous avons dû insister tout spécialement : nous verrons, en effet, que la vibration par influence joue un rôle très-considerable dans le phénomène de l'audition.

Les raisonnements qui précèdent supposent que le corps sonore et le corps auquel se transmettent les vibrations sont tels qu'ils produisent le même son ; cette condition n'est pas absolument indispensable, et le même

(1) *Traité d'acoustique*, par Chladni, 1809.

(2) *Stentor hyaloclastes, sive de scypho vitro per vocis humanæ sonum rupto*, 1683.

(3) *Trattato del suono e de tremore armonici*, 1780.

effet se produit, quoique plus faiblement, lorsque le son que produirait le corps influencé est l'un des harmoniques du son produit par le corps sonore ; les vibrations de celui-ci ont une durée qui est un multiple de la durée des vibrations de celui-là ; dès lors l'ébranlement communiqué arrivera non plus à chacune des périodes de la vibration de la seconde corde, mais seulement de deux en deux, trois en trois, etc., et chaque fois il se retrouvera dans les mêmes conditions et, par suite, produira des effets qui s'ajouteront et pourront communiquer un mouvement d'une amplitude sensible ; si nous reprenons la comparaison indiquée précédemment, on conçoit que l'on peut mettre une cloche en branle en lui communiquant une impulsion, non pas à chaque oscillation, mais de deux en deux, de trois en trois, etc. Dans ce cas seulement, le mouvement communiqué devra avoir moins d'amplitude, puisque l'impulsion doit réparer chaque fois les pertes dues aux résistances qui se manifestent pendant un certain nombre de vibrations. C'est, en effet, ce que l'on observe, et les vibrations ainsi produites par influence, lorsque les corps sonores ne vibrent pas à l'unisson, sont moins énergiques que dans le cas où les sons produits sont les mêmes.

Aucun son ne peut se produire par influence d'un corps sonore sur un corps susceptible de produire un son plus grave, ou du moins l'influence ne pourra produire ce son plus grave, elle pourra seulement donner naissance à l'un des harmoniques de ce son plus grave, si cet harmonique est un unisson ou harmonique du son directement produit.

En un mot, si la communication du mouvement d'une Gariel. 7

certaine onde peut donner naissance à une autre onde égale ou plus courte, elle ne peut en aucune façon et dans aucun cas donner naissance à une onde plus longue. Car alors, forcément, si parmi les ébranlements successifs il y en a qui se produisent de manière à ajouter leurs effets, il en existe dans l'intervalle d'autres qui tendent précisément à les détruire.

Nous n'avons parlé dans ce qui précède que des vibrations transmises à des cordes ou à des masses d'air, mais cette influence peut aussi se produire sur d'autres corps ; les plaques élastiques minces sont susceptibles de vibrer en présentant les mêmes conditions de rapport de hauteur des deux sons.

Enfin, les membranes sont aussi susceptibles d'entrer en vibration sous l'influence d'un corps sonore placé à distance ; mais, comme nous l'avons dit, une membrane, étant susceptible de vibrer d'un grand nombre de manières qui n'ont aucun rapport entre elles, sera aussi capable de résonner sous l'influence d'un très-grand nombre de sons, nombre presque illimité si cette membrane peut éprouver des variations de tension.

X

Le mouvement vibratoire d'un corps se communique à tous les corps élastiques avec lesquels il est en contact ; on conçoit que la transmission dépend non-seulement de l'intensité de ce mouvement vibratoire, mais encore de la liaison qui existe entre ces corps. Une corde et une verge ou une plaque de grande surface ne transmettront pas à l'air de la même façon les mouvements vibratoires qui les animent ; à peine la corde déplace-

ra-t-elle l'air et lui communiquera-t-elle le mouvement tandis que la large surface produira tout d'abord un effet bien plus considérable. On augmenterait donc l'intensité des sons produits, si l'on pouvait adapter des surfaces assez étendues sans modifier le son produit. Il faut bien remarquer que d'autre part, pour un même ébranlement initial, la corde vibrerait plus longtemps isolée que lorsqu'on lui aurait adapté une lamelle quelconque; cette addition aurait pour effet du reste de faire varier le son de la corde qui perdrait bien certainement alors ses principales propriétés.

L'application de la transmission des vibrations par influence permet d'augmenter considérablement l'intensité d'un son sans agir directement sur le corps sonore et sans faire varier la nature du son. Considérons par exemple, un diapason que nous ferons vibrer en le tenant à la main par sa tige; il ne donnera naissance qu'à une bien faible sensation auditive; mais, posons cette tige sur la paroi d'une caisse en bois sec, susceptible de vibrer elle-même de manière à produire le même son que le diapason; en vertu du phénomène d'influence que nous venons d'étudier elle vibrera réellement et augmentera d'autant l'intensité du son du diapason qui deviendra perceptible à d'assez grandes distances; l'effet sera encore augmenté si la capacité de la caisse est telle que l'air qui y est renfermé vibre lui-même avec la même rapidité que le diapason et la planchette sur laquelle celui-ci repose.

Un effet analogue se produit lorsqu'on tend une corde sur une planche ou sur l'une des parois d'une caisse; les vibrations de la corde sont transmises à la caisse par les chevalets sur lesquels porte la corde et de la

caisse à l'air ; l'air intérieur peut lui-même vibrer et s'il communique par des ouvertures avec l'air extérieur, l'intensité du son sera augmentée.

Il n'est point besoin d'insister dès lors sur le rôle des pièces dites *tables d'harmonie* que l'on retrouve dans tous les instruments de musique dans lesquels le son est produit par des cordes: le piano, le violon, la harpe, présentent de semblables tables, qui pour produire le meilleur effet doivent être susceptibles de vibrer à l'unisson du plus grand nombre possible de notes.

Des expériences intéressantes de Savart ont montré que dans toutes ces communications de vibrations, la direction des vibrations se conserve; il étudiait la manière dont se comportait du sable projeté sur les diverses pièces d'un appareil de forme assez complexe et dont il ébranlait l'une des parties seulement.

XI

Une application très-intéressante de ces phénomènes de résonnance et d'influence est celle qu'en a faite M. Helmholtz pour la construction des *résonnateurs*. Ces appareils sont des vases métalliques ou en verre, ayant des formes diverses, sphères, cylindres et dont la capacité est déterminée de manière que l'air qui y est contenu vibre en produisant un son donné; ces résonnateurs présentent deux ouvertures opposées : l'une rétrécie s'introduira dans l'oreille, l'autre sera dirigée du côté du corps sonore.

L'air contenu dans le résonnateur ne vibrera pas pour tous les sons émis à quelque distance; il vibrera pour le son même pour lequel il a été construit, et l'expérimentateur qui l'aurait appliqué à son oreille éprou-

vera une sensation énergique et entendra fortement le son émis; si le son produit devant le résonnateur est tel que sa note propre en soit un harmonique il résonnera encore mais plus faiblement; l'observateur entendra ce son mais moins fortement que le précédent.

Pour tous les autres sons, l'air du résonnateur restera au repos et le mouvement vibratoire ne sera point transmis à l'oreille à laquelle il est appliqué; si donc, l'autre oreille est bouchée, aucun son ne sera perçu.

L'emploi d'un certain résonnateur appliqué à une oreille, l'autre étant bouchée, aura donc pour effet dans une série de sons successifs ou simultanés de faire entendre en le renforçant un certain son, celui que rend le résonnateur lui-même; de faire entendre aussi, mais avec moins d'intensité, les sons dont ce premier est un harmonique et d'éteindre presque absolument tous les autres.

On conçoit qu'avec une série de résonnateurs de dimensions graduées et correspondant aux diverses notes que l'on recherche, on puisse faire l'analyse d'un mélange quelconque de sons, comme on pourrait faire l'analyse d'une lumière composée, en la regardant successivement à travers des verres diversement colorés; une seule lumière pouvant passer à travers chacun des verres, les couleurs de ceux qui auront montré la flamme éclairante correspondront aux lumières simples qui s'y rencontrent.

La communication des vibrations à l'air comprises dans un résonnateur augmente, comme nous l'avons dit, l'intensité du son propre au résonnateur en éteignant presque absolument les sons qui correspondent aux autres notes. Si à l'ouverture du résonnateur que l'on

place ordinairement à l'oreille, on tend une membrane, les vibrations de l'air pourront également se communiquer à la membrane si celle-ci est susceptible de prendre ce mouvement vibratoire, ce à quoi l'on peut toujours arriver en faisant varier la tension. Supposons que cette membrane constitue l'une des parois d'une sorte de caisse dont les autres parois sont rigides et qui est traversée par un courant gazeux, les variations de volume de cette caisse produiront des changements réguliers et périodiques dans l'écoulement du gaz; pour chaque des oscillations complètes de la membrane, le gaz coulera successivement plus vite et plus lentement que si les parois avaient toutes été inflexibles. Dans le cas où le gaz est inflammable et enflammé, la flamme qui prend naissance subira toutes les mêmes variations que le courant de gaz et les changements de grandeur de cette flamme mettront en évidence cette périodicité dans l'écoulement du gaz; mais les variations de la flamme sont trop rapides pour être perçues directement à l'œil; il faut séparer les images qui se superposent par suite de la persistance des impressions sur la rétine, ce à quoi l'on peut arriver soit par l'emploi du phénakistiscope, soit par l'emploi d'un miroir tournant, qui par un mouvement de rotation convenable nous montrent la flamme tantôt grande, tantôt petite. Tel est le principe de l'appareil à flammes manométriques de Koenig : il se compose d'une série de résonnateurs correspondant chacun à une flamme comme nous venons de l'expliquer. Toutes ces flammes se trouvent placées sur une même verticale devant un miroir que l'on fait tourner; les flammes seront immobiles tant qu'il ne se produira pas un son correspondant à l'un des résonnateurs;

l'expérimentateur qui l'aurait appliquée à son oreille éprouverait alors une sensation de son.

mais sitôt que l'un de ces sons sera émis soit isolément, soit dans un ensemble quelconque, la flamme se mettra à varier; si l'on a un son ou un bruit complexe, plusieurs flammes peuvent entrer en mouvement et signaler l'existence des sons que donneraient les résonnateurs qui leur correspondent; si donc, on avait une série de résonnateurs comprenant l'échelle des sons tout entière, l'une des flammes au moins vibrerait dès qu'un son quelconque serait produit. Cet appareil est donc un *analyseur* des sons et des bruits et permet de reconnaître les éléments divers qui composent chacun de ceux-ci; on peut mettre ainsi hors de doute l'existence de sons musicaux dans presque tous les bruits. Comme nous l'avons dit, cet appareil a en outre l'avantage de donner naissance à des phénomènes qui n'ont rien de personnel et qui peuvent être saisis d'un auditoire très-nombreux, ce qui le rend indispensable dans toute expérience d'acoustique destinée non aux recherches mais à l'enseignement; c'est là une application très-ingénieuse et très-utile des résonnateurs de M. Helmholtz. Nous devons signaler ce fait très-intéressant au point de vue de la théorie acoustique, c'est que, en aucun cas, l'oreille ne s'est trouvée en désaccord avec les résultats signalés par l'emploi d'instruments analyseurs quelconques.

Il est assez important de remarquer que dans cet appareil comme dans tous ceux qui sont basés sur la communication des vibrations par influence, chaque résonnateur et par suite, chaque flamme est sensible non-seulement à son propre son, mais encore à tous ceux dont celui-ci est un harmonique. Nous devons également signaler ce fait vérifié par l'expérience et

expliqué par le calcul (1), que lorsqu'un corps vibre, il communique ses vibrations à tout autre corps dont le mouvement vibratoire s'écarte peu du sien; mais que le mouvement transmis atteint un maximum lorsque les corps vibrants sont à l'unisson. Si donc on avait une série *continue* de résonnateurs et de flammes manométriques, tout son ferait varier fortement la flamme du résonnateur susceptible de produire ce son et faiblement quelques-unes des flammes correspondant aux sons les plus voisins, soit plus hauts, soit plus bas.

XII

Si deux ou plusieurs sons sont émis simultanément, il peut arriver, comme nous l'avons indiqué, que dans des conditions toutes particulières ils viennent à interférer; mais en général, les mouvements vibratoires coexistent sans se détruire et parviennent à l'oreille en donnant à l'air des déplacements plus ou moins complexes; ils donnent alors naissance à une sensation également complexe mais dans laquelle l'expérience montre que l'on distingue séparément chacun des sons qui ont été produits dans l'ensemble total formant accord consonant ou dissonant qui est obtenu; il y a là une propriété fort remarquable et très-importante qui montre encore la supériorité de l'oreille sur l'œil; car, la superposition de deux images colorées diversement produit, par l'intermédiaire de notre rétine, une impression visuelle que nous ne pouvons en aucune façon décomposer en ses éléments, comme nous le faisons avec un

(1) Voir en particulier Verdet, *Cours de physique de l'École polytechnique*.

peu d'habitude pour un ensemble de deux ou plusieurs sons.

La coexistence et la superposition des vibrations correspondant à deux ou plusieurs sons peut être mise en évidence par une expérience faite en modifiant quelque peu la disposition de l'appareil de Koenig. Faisons arriver à une seule flamme tous les tuyaux qui ont été en rapport avec les divers résonnateurs. Lorsqu'un son unique aura été produit, la flamme vibrera comme elle eût vibré dans la disposition précédente puisqu'un seul résonneur aura agi ; mais si l'on émet deux ou plusieurs sons, la flamme subira simultanément les actions des résonnateurs correspondants, et les images que l'on percevra seront de dimensions inégales, et tout en présentant une périodicité incontestable passeront par les variations les plus inégales pendant la durée de cette période qui peut être assez longue. Dans le cas seulement où les sons émis correspondent à des nombres de vibrations qui sont dans des rapports simples, cette période sera courte et le mouvement présentera une forme simple.

Un autre appareil basé sur la transmission des vibrations aux membranes, qui a été construit par M. Koenig d'après les idées de M. Scott, permet d'étudier des sons successifs simultanés ; c'est le *phonautographe*. Il se compose d'une membrane qui est tendue au foyer d'un large cornet parabolique que l'on dirige du côté du corps sonore ; cette membrane porte en son centre une pointe qui se déplace devant un cylindre tournant que l'on a préalablement recouvert d'une feuille de papier enduite de noir de fumée. La membrane soumise à un seul mouvement vibratoire tracera une ligne

sinuuseuse très régulière, si la rotation du cylindre est uniforme; si l'on change le mouvement vibratoire, il en sera de même de la ligne sinuuse tracée dont les divers maxima seront également éloignés entre eux, mais différemment de ce qu'ils étaient précédemment; on pourra ainsi par l'écartement de ces maxima déterminer la hauteur de chacun des sons produits : on a pu tracer ainsi et reconnaître des airs composés de sept notes.¹¹⁹

Si les sons différents sont émis simultanément la membrane prendra un mouvement résultant de ces deux sons et la courbe tracée aura une forme également plus ou moins complexe et qui serait telle, par exemple, que chacune de ses ordonnées fût la somme algébrique des courbes qui caractérisent chacun des mouvements composants.

Les expériences ont donné des résultats assez nets et bien caractérisés dans certains cas qui sont précisément ceux où les tracés doivent avoir les formes les plus simples par suite des rapports simples aussi des nombres de vibration.

Cet appareil, si son emploi était facile et si les résultats étaient toujours fidèles, serait celui que l'on devrait employer en toutes circonstances puisqu'il donne pour chaque expérience un tracé indépendant de l'observateur et que celui-ci peut étudier à volonté et sans avoir aucune expérience à reprendre.

XIII

En étudiant attentivement les sons produits dans diverses circonstances, à l'aide de l'oreille seulement, on est arrivé il y a longtemps déjà à cette conclusion que

si pour quelques-uns on ne peut y reconnaître qu'une sensation parfaitement unique, pour la plupart on y distingue un plus ou moins grand nombre de notes diverses dont les rapports dépendent intimement de la nature du corps sonore et du mode ébranlement : nous désignerons les premiers sous le nom de *sons simples* et les autres sous le nom de *sons complexes*. Une analyse plus complète des sensations auditives telle qu'on peut la faire à l'aide des résonnateurs a conduit absolument aux mêmes résultats. Les expériences objectives que l'on fait à cet égard montrent nettement que ces sons existent bien réellement et qu'ils ne sont pas seulement le résultat d'un effet de notre imagination.

Le P. Mersenne (1) et Descartes (2) ont eu connaissance de la coexistence de plusieurs sons dans une même corde, mais ils ne savaient pas l'expliquer ; le dernier pensait même qu'ils doivent être attribués seulement aux cordes irrégulières. Rameau (3) prend même ces sons comme bases de la théorie musicale, et reconnaît directement les sons qui accompagnent les notes fondamentales émises par la voix. Mais pour en avoir une théorie et une explication satisfaisante il faut arriver jusqu'à D. Bernouilli (4) ; la question a été reprise et étudiée complètement par un grand nombre d'auteurs parmi lesquels nous citerons entre autres : Lagrange dans ses recherches sur le son (5), Giordano Riccatti (6), Matthew Young (7).

(1) Harmonie universelle, 1636, Paris.

(2) Epistola.

(3) Nouveau système de musique théorique. Paris, 1726.

(4) Mémoires de l'Acad. de Berlin, 1753 et 1763.

(5) Miscel. Taurinensa, t. I et II.

(6) Delle corde ovvero fibre elastiche.

(7) Enquiry into the principal phenomena of sounds and musical strings.

On peut se rendre compte ainsi qu'il suit de cette production de sons accessoires.

Nous avons dit qu'une corde, qu'un tuyau, sont susceptibles de vibrer de diverses façons, de manière à donner successivement divers sons partiels : chacun de ses sons correspond à un mode de mouvement qui est donné par les solutions d'une équation différentielle ; on sait que dans ce cas toute somme algébrique de diverses solutions particulières sera aussi une solution de la même équation et donnera donc dans ce cas un mode de mouvement compatible avec les conditions physiques de la question ; autrement dit, nous avons vu par exemple, qu'une corde peut vibrer séparément dans sa totalité ou dans sa moitié ou par tiers, ou par quart. etc ; deux ou plusieurs de ces mouvements peuvent coexister, c'est-à-dire que pendant que la corde vibre en entier, chacune de ces moitiés peut vibrer, les déplacements que produirait chacun des mouvements s'ajoutant algébriquement pour donner le mouvement des différents points de la corde (voir la note D) ; trois mouvements vibratoires ou même davantage peuvent se superposer et coexister sur une même corde. [Un effet analogue se produit aussi dans les tuyaux sonores, de telle sorte que le mouvement de chacun des points résulte de la superposition de plusieurs ondes sonores dont les longueurs sont les divers sons multiples de la longueur d'onde du son fondamental.

D'après ce que nous avons dit, les diverses longueurs d'onde étant des sous-multiples de la longueur d'onde correspondant au premier son partiel, on voit que, au commencement de chacune des vibrations de ce son fondamental, les diverses vibrations des autres sons par-

tieuses retrouveront toujours dans les mêmes conditions, si bien que ces mouvements superposés au son fondamental changeront plus ou moins notablement la forme de la courbe représentative de chacun des points, mais n'altèreront en rien ni la périodicité de ces vibrations, ni leur durée.

Les sons que l'on entend dans les vibrations complexes des cordes, comme aussi lorsque l'on fait parler un tuyau ouvert sont ceux dont les longueurs d'ondes sont respectivement $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}$, etc., de la longueur d'onde au son fondamental; si donc nous appelons *ut*, la note fondamentale et que nous désignions suivant l'habitude les diverses octaves successives par la valeur de l'indice, les notes qui se font entendre sont :

ut₁ ut₂ sol₂ ut₃ mi₃ sol₃ — ut₄
1 2 3 4 5 6 7 8

Le septième son ne correspond pas à une note de la gamme ordinairement employée: dans le cas de tuyaux fermés les longueurs d'ondes étant $1, \frac{1}{3}, \frac{1}{5}, \frac{1}{7}$, etc., on n'entend que les harmoniques d'ordre impair (sons partiels de rang pair), par exemple :

ut₁ sol₂ mi₃ — ré₄
1 3 5 7 9

Dans le cas des cloches (1), des plaques (2) des verges ou diapasons, les sons divers qui peuvent être produits isolément et qui par suite peuvent aussi se superposer et coexister avec le son principal n'ont avec celui-ci que des rapports compliqués et même dans la plupart des

(1) Euler. *De sono campanarum in Nov. Comment. Acad. Pétropolis*, tome X.

(2) Chladni, *loc. citato*.

cas ne font nullement partie d'une gamme à laquelle appartiendrait aussi ce son fondamental ; en général, aussi, dans la coexistence des sons, les sons superposés à la note la plus basse ne possèdent qu'une faible intensité, et il faut prêter une vive attention pour les distinguer à l'oreille ; on peut y arriver cependant en s'en approchant beaucoup. En outre, ces sons que l'on peut distinguer ne forment nullement, en général, des consonnances entre eux ou avec le son fondamental. On voit que dans ce cas, le nom d'harmoniques leur serait mal appliquée, puisqu'ils ne présentent point un ensemble harmonieux.

XIV

Lorsque l'on eut reconnu dans la plupart des sons musicaux la présence de sons plus élevés et plus faibles que le son fondamental, on tomba dans l'erreur de penser qu'un son ne peut jamais exister sans cet accompagnement naturel. Thomas Young (1) fit justice de cette erreur en montrant que l'on peut empêcher la production de certains harmoniques en touchant les points où, par suite de leur existence, il se manifesterait un ventre. Nous devons en passant, montrer une application de cette remarque : par la pratique seule, les facteurs de pianos sont arrivés à faire frapper le marteau sur la corde au $\frac{1}{7}$ ou au $\frac{1}{9}$ de celle-ci, ce qui a précisément pour effet d'éteindre le 7 ou le 9^e harmonique, qui, parmi les 10 premiers, sont les seuls qui ne forment pas avec le son fondamental de la corde un accord consonnant.

On peut du reste produire un son simple par l'un

(1) London. Philosophical transactions, 1800.

des procédés suivants dont M. Helmholtz a le premier fait usage.

On fixe un diapason sur un support qui repose sur une table par l'intermédiaire de corps qui ne sont pas susceptibles de transmettre les vibrations ; le mouvement de ce diapason est produit et entretenu par l'action d'un électro-aimant entre les branches duquel il se trouve et qui est périodiquement soumis à l'action d'un courant électrique ; ces périodes d'action qui sont isochrones à celle du diapason sont obtenues par un autre diapason identique, qui sert d'interrupteur, et qui est lui-même soumis à l'action d'un électro-aimant et du même courant. Lorsque le diapason est mis en vibration, on n'entend qu'à peine un son très-faible, parce que ces vibrations ne peuvent se communiquer à l'air autrement que par l'action des branches qui produisent peu d'effet.

Devant les branches de ce diapason, on a placé un cylindre creux dont l'axe est horizontal et dont la base qui est devant le diapason présente une ouverture que l'on peut fermer à volonté par un petit couvercle. Le cylindre, du reste, a des dimensions telles qu'il est accordé à l'unisson avec le diapason : enfin ce cylindre peut à volonté s'approcher ou s'éloigner du diapason. Si, tandis que le diapason vibre, on approche le cylindre après avoir débouché l'ouverture, on entend aussitôt un son très-pur, assez intense et dans lequel on ne peut distinguer aucun son accessoire, soit avec l'oreille seule, soit à l'aide du résonnateur. On peut facilement se rendre compte de l'effet produit, car d'après les indications que nous avons données précédemment on voit que l'air du cylindre entrera facilement en vibration sous l'influence

du mouvement du diapason et que l'on renforcera notamment le son principal, tandis que les sons accessoires qui accompagnent celui-ci, et dont les nombres de vibrations varient suivant une certaine loi (les nombres de vibrations sont proportionnels aux carrés des nombres entiers) ne peuvent être renforcées par les sons accessoires du tuyau dont les nombres de vibrations suivent une autre loi (la proportionnalité aux nombres impairs). On peut faire varier considérablement l'intensité du son produit par le déplacement du cylindre et par la fermeture plus ou moins complète à l'aide du couvercle mobile. Lorsque cette fermeture sera absolue, le diapason vibrera presque tout à fait silencieusement.

On peut encore obtenir des sons simples par le procédé suivant, qui se base sur ce fait expérimental qu'une corde métallique chargée en son milieu d'une masse assez considérable ne contient comme sons accessoires que des sons qui ne sont point des harmoniques du son principal. Une corde de piano traverse une pièce de monnaie que l'on place au milieu de la longueur et que l'on y fixe invariablement; cette corde qui n'est pas reliée à une table d'harmonie est placée en présence du sonomètre, la corde de cet appareil étant à l'unisson du son produit par la corde surchargée; les vibrations du son principal de celle-ci se transmettent à la boîte du sonomètre par l'intermédiaire de la corde, par suite le son aura une intensité telle qu'il sera nettement perceptible; mais aucun des sons accessoires de la corde surchargée ne peut se transmettre au sonomètre, puisqu'ils ne sont pas les harmoniques du son que rend la corde de celui-ci, et que ces harmoniques seuls peuvent

la mettre en mouvement avec une intensité appréciable.

M. Helmholtz s'est servi d'un appareil à peu près analogue à celui que nous venons d'indiquer pour déterminer la limite de perception des sons les plus graves : il a évité de cette manière le reproche que l'on avait fait avec raison à d'autres expériences, celle de Savart en particulier, et dans lesquelles il semble que le son perçu était non pas celui qui correspondait au nombre de vibrations calculées, mais un de ses harmoniques, l'octave par exemple ; cette erreur ne pouvait être à craindre dans les expériences de M. Helmholtz puisque les sons accessoires qui existaient encore étaient, assez élevés et très-différents des harmoniques, de sorte qu'il ne pouvait y avoir confusion.

Enfin il résulte encore des recherches de M. Helmholtz sur le timbre que les sons de flûte et que ceux des tuyaux bouchés de l'orgue sont à peu près simples, les sons accessoires qui accompagnent la note fondamentale ayant une faible intensité.

XV

Les diverses considérations précédentes nous permettent d'aborder maintenant la question du timbre et de ses causes : on doit à M. Helmholtz (1) une série d'expériences des plus curieuses et des plus intéressantes, qu'il nous suffira de résumer pour avoir fait connaître à peu près tout ce que l'on sait sur cette question, quoique les recherches à cet égard remontent au moins jusqu'à Euler (2).

(1) *Die Lehre von den Tonempfindungen.*

(2) *Eclaircissements sur la génération du son* (Académie de Berlin, 1765). — *De motu aeris in tubis* (Nov. comm. ac. Petrop. tom. XVI).
Gariel.

En étudiant à l'aide des résonnateurs les sons produits par divers procédés, en employant successivement les différents instruments de musique, M. Helmholtz est arrivé à reconnaître que la même note fondamentale prenant naissance, ce ne sont pas toujours les mêmes harmoniques que l'on parvient à distinguer, ou bien ces harmoniques présentent des intensités très-diverses, ou n'ont qu'une durée presque inappréhensible, et c'est précisément ces différences dans le nombre ou l'intensité des sons accessoires qui accompagnent le son fondamental qui sont la cause des divers timbres.

On peut, on le conçoit facilement rendre ces différences visibles par l'emploi d'un appareil à flammes de Koenig, devant lequel on fait produire à divers instrument la même note avec une intensité aussi semblable que possible; on observe alors que, tandis que la flamme du son principal vibre dans tous les cas de la même façon, les flammes qui communiquent aux autres résonnateurs présentent des variations considérables d'un instrument à l'autre, deviennent immobiles pour certains, tandis qu'elles sont violemment agitées pour d'autres.

En répétant et variant ces analyse du son, M. Helmholtz est arrivé à caractériser les divers timbres usités en musique; nous allons donner un résumé des résultats les plus importants :

1^o Les sons simples (diapason, flûte, etc.) présentent beaucoup de douceur, de charme; mais ils manquent d'énergie et sont sourds dans les régions graves.

2^o Les sons accompagnés des harmoniques jusqu'au sixième et de moyenne intensité sont pleins, harmonieux; il ont quelque chose de plus riche, de plus fourni que les sons simples. Parmi les sons qui jouissent de ces

qualités, on doit citer ceux émis par le piano, les tuyaux ouverts, la voix humaine, le cor, etc.

3° Si les harmoniques impairs existent seuls, comme dans les petits tuyaux bouchés de l'orgue, la clarinette, la harpe, le son est creux et semble nasillard, si le nombre des harmoniques est un peu considérable.

4° Si les harmoniques, à partir du sixième, dominent par leur netteté, le son devient aigre, dur et mordant : dans cette catégorie entrent les sons forts de la voix humaine, ceux des instruments à archet, des instruments à anche (basson et hautbois) et les sons des instruments en cuivre.

5° Enfin, d'une manière générale, le timbre est *plein*, si le ton fondamental domine ; il semble vide, au contraire, si les harmoniques ont une importance prédominante.

Il importe de remarquer que l'effet produit par un instrument dépend en outre de certains bruits qui deviennent promptement caractérisques pour une oreille qui les entend sans s'en rendre compte : tels sont, par exemple, le frôlement de l'archet sur les cordes, le bruissement de l'air dans les sons produits dans l'orgue, etc. Ces bruits prennent une très-grande importance, qui n'a pas été étudiée à fond jusqu'à présent, dans la voix humaine considérée au point de vue de la parole.

XVI

La différence d'impression toute particulière que nous ressentons lorsque nous entendons chanter à la même personne la même note, en prononçant d'abord un *A*, puis un *O*, semble rentrer entièrement dans le timbre

tel que nous l'avons défini. De nombreux observateurs se sont occupés de cette question, mais c'est aux travaux de Donders (1), de Willis (2) et de M. Helmholtz que l'on doit les connaissances que l'on possède à cet égard. Le mode de recherche a varié avec l'expérimentateur.

Willis associait des tuyaux à anche à des tubes résonnans dont il faisait varier la longueur jusqu'à reproduire sensiblement le son de chacune des voyelles ; Donders, étudiait le frôlement qui se produit quand on chuchote ; M. Helmholtz enfin se servit d'abord des résonnateurs, puis il étudia directement les sons que la cavité buccale dans les diverses positions que nous lui donnons dans la prononciation est capable de rendre ; pour cela, disposant la bouche et les lèvres comme s'il voulait prononcer une certaine voyelle, il en approchait successivement plusieurs diapasons jusqu'à ce qu'il s'en trouvât un dont le son fût notablement renforcé, la note qu'il était susceptible de donner était également celle suivant laquelle la bouche était accordée pour ainsi dire. On conçoit alors que le son produit par les cordes vocales, mettant en vibration plus ou moins complétement l'air de la cavité buccale, s'accompagnera de sons accessoires dont la nature pourra produire des sensations toutes spéciales. Les expériences de Willis, de Donders et de M. Helmholtz, quoique ne donnant pas absolument les mêmes résultats, tendent à attribuer à ces sons de résonnance des cavités par lesquelles se produit la voix une importance capitale, ces

(1) Archiv für die Hollandischen Beiträge für Natur und Heilkunde, t. I.

(2) Transactions of Cambridge phil. Society, t. III.

sons se retrouvant à peu près les mêmes pour une même voyelle, quelle que soit la note chantée. Ainsi, d'après M. Helmholtz, le son caractéristique de l'OU est *fa₁*, tandis que l'É a deux sons caractéristiques, le *fa₂* et le *sol₃*. Il résulte de ce fait que le timbre des voyelles a un caractère différent du timbre des instruments : dans ceux-ci, ce sont toujours les harmoniques de même rang qui sont renforcés, tandis que, pour les voyelles, ce sont les harmoniques qui se rapprochent le plus de la note caractéristique, de sorte que le rang de ces harmoniques dépend de la hauteur absolue de la voyelle chantée. Cette remarque rend bien compte de ce fait expérimental, que les diverses voyelles ne se prononcent pas également bien en chantant dans toutes les régions de la voix.

Cette théorie présente cependant une difficulté lorsque le son émis est plus élevé que la note suivant laquelle la cavité buccale est accordée, car alors la résonnance de l'air qui y est renfermé ne peut acquérir une intensité un peu considérable ; il faudrait admettre que, dans ce cas, ce n'est pas le son fondamental de cette cavité qui vient renforcer le son émis, mais l'un de ses harmoniques coïncidant avec l'un des harmoniques de la note sur laquelle est chantée la voyelle.

Les expériences sur lesquelles sont basées les conclusions précédentes sont fort délicates, et rien ne prouve que le dernier mot soit dit à ce sujet ; il faut bien remarquer que la cavité buccale est de forme irrégulière, et que l'air qui y est contenu peut présenter des mouvements vibratoires complexes ; que l'assimilation avec une cavité conique ou avec une bouteille à large panse est incomplète. Enfin, il nous semble que, si les faits

indiqués se retrouvent, ils ne sont pas les seuls; que, s'ils constituent des conditions nécessaires pour la production des voyelles, ces conditions ne sont probablement pas suffisantes.

Il nous reste à dire que la production des consonnes que l'on joint aux voyelles dans le langage sont probablement des bruits accessoires, bruits explosifs, siflements, que nous sommes habitués à reconnaître dans leurs plus petites modifications.

XVII

Les expériences analytiques de M. Helmholtz ont été complétées par des synthèses dans lesquelles il a pu reproduire à volonté certains sons avec un caractère, un timbre bien déterminé. Nous devons insister quelque peu sur ces expériences synthétiques.

L'appareil employé par M. Helmholtz se compose d'une série de diapasons analogues à celui que nous avons décrit précédemment; ils sont accordés de manière à ce qu'ils représentent les premiers harmoniques du plus grave (il y en avait d'abord 8, puis 10). Le mouvement de vibration de chacun d'eux est entretenu par une électro-aimant dans lequel passe périodiquement un courant, les fermetures et ruptures du circuit étant produites pour tous les électro-aimants par un diapason identique au plus grave; le courant aimantait les divers électro-aimants, à chaque vibration du diapason le plus grave; toutes les 2 vibrations de celui qui donnait le premier harmonique, toutes les 3 vibrations du suivant etc.; même dans le cas de 8 à 10 diapasons l'action est encore très suffisante pour entretenir le mouvement de chacun d'eux.

On conçoit que si l'on ouvre un seul tuyau que l'on approche le plus possible de son diapason, on aura un son simple au maximum d'intensité, on fera varier cette intensité, en découvrant plus ou moins les ouvertures des tuyaux sonores et l'on pourra ainsi adjoindre au son le plus grave pris comme son fondamental divers harmoniques dont l'intensité est réglée à volonté. En opérant dans des conditions variées, M. Helmholtz est arrivé à reproduire le timbre de certains jeux d'orgue (auxquel il manquait le sifflement caractéristique que nous avons signalé) le son du cor, celui de la clarinette en reproduisant les diverses conditions d'intensité que l'analyse du timbre lui avait indiquées. Il ne put reproduire le son des instruments à anche parce qu'il manquait de diapasons correspondant à des harmoniques assez élevés.

La voix humaine a pu être assez bien reproduite et l'on a pu faire entendre assez distinctement certaines voyelles OU, O, A, mais il en est d'autres que l'on ne put obtenir parce que la série de diapasons n'était pas assez étendue.

Ces expériences synthétiques des voyelles se font à volonté et l'on peut prévoir les résultats que l'on obtiendra ; on peut du reste les varier de bien des manières et elles présentent une grande importance. Il est bon de rappeler cependant les expériences de Willis déjà citées, ainsi que les suivantes : il faisait tourner avec rapidité une roue dentée contre laquelle vient buter une lame de ressort ; dans ce cas et si le ressort a une longueur convenable, deux sons se produisent, l'un dû aux déplacements périodiques du ressort sous l'action des dents, son qui est fixe pour une même vi-

tesse de la roue, l'autre qui dépend de la longueur du ressort; en faisant varier cette longueur, on peut obtenir des sons qui viennent renforcer le son fixe diversement, et il se produit un son résultant rappelant approximativement les caractères des principales voyelles.

Enfin nous voulons citer une expérience facile à répéter et qui donne à la fois pour ainsi dire une analyse et une synthèse : cette expérience nous permettra d'ailleurs, plus tard de faire comprendre nettement une question d'une importance capitale.

On enlève à un piano droit non-seulement les parois antérieures de la caisse, mais même le sommier qui porte les marteaux et les étouffoirs de manière à rendre entièrement libres toutes les cordes. L'observateur se plaçant alors devant l'instrument émet un son soit en chantant, soit à l'aide d'un instrument, une clarinette par exemple. Le son est assitôt renforcé ce que l'on pouvait prévoir; mais, en outre, si l'on vient à interrompre brusquement le son que l'on émet, on l'entend se continuer et l'on distingue non-seulement la note principale, mais encore avec une certaine netteté le timbre de l'instrument ou le caractère de la voyelle qui a été prononcée.

Le phénomène est facile à comprendre lorsque l'on connaît la cause du timbre; le son produit par l'observateur se compose d'une note fondamentale prédominante à laquelle se joignent d'autres notes plus élevées, d'intensités diverses; chacune de ses notes fait résonner la corde correspondante du piano avec une intensité proportionnelle à celle même qu'elle possède et ces cordes continuant à résonner même après la cessation des sons influençants reproduisent, bien qu'affaiblies, la

note fondamentale et les notes accessoires avec des intensités qui sont dans le même rapport; le timbre se trouve donc reproduit.

Si l'on cherche à se rendre compte dans cette expérience des cordes qui ont été mises en vibration, on aura fait l'analyse du son complexe; on voit que l'instrument fait naturellement l'analyse et la synthèse.

La connaissance de la cause du timbre permet de se rendre compte de certains faits que la pratique de la musique avait appris, mais auxquels on ne pouvait appliquer aucune explication plausible: parmi ces faits nous pouvons citer la différence du timbre des sons que fournit une même corde lorsqu'on l'ébranle en la pinçant, ou par le moyen d'un archet; dans ce dernier cas, le son fondamental est relativement plus fort que dans le premier; les premiers harmoniques sont plus faibles; les sons partiels aigus, (du 6^e au 10^e) y acquièrent plus d'importance et causent le mordant particulier aux instruments à archet. Comme autre exemple intéressant, nous devons citer les jeux dits de *fourniture* qui, dans l'orgue, s'obtenaient en ajoutant à chaque note des notes produites par des tuyaux disposés à cet effet et donnant en général l'octave et la douzième; on voit que l'on ne fait dans ce cas que reproduire un son complexe à l'aide de sons simples afin d'obtenir un effet plus satisfaisant à l'oreille, un son plus plein, plus harmonieux.

Il existe donc dans la plupart des sons, sons complexes, une superposition de sons simples, mais cette superposition peut se faire de bien des manières; le résultat de la composition de deux mouvements vibratoires alors même qu'ils ont la même direc-

tion, dépend d'abord de la nature de chacun des mouvements, mais en outre de la différence de phase lorsque les deux mouvements restent les mêmes ; autrement, si l'on considère les courbes représentatives des deux mouvements composants, courbes que nous supposons de forme invariable, nous savons que la courbe du mouvement résultant sera telle que chacun de ses points aura une ordonnée égale à la somme algébrique des ordonnées des points correspondants des deux autres courbes ; mais l'on conçoit facilement que la forme de la courbe résultante dépend intimement de la position relative des deux courbes composantes ; que si l'une restant fixe, l'autre est déplacée d'une quantité quelconque parallèlement à l'axe des temps pris comme abscisses, les diverses sommes d'ordonnées qui sont les ordonnées résultantes suivront une toute autre loi que précédemment.

Le timbre dépend-il seulement de la nature des sons concomitants et n'aurait-il pas en outre un rapport avec les différences de phase des mouvements vibratoires correspondant à ces sons ? Ne serait-il pas, par suite variable avec la forme de la courbe du mouvement, avec la loi algébrique qui définit ce mouvement ? Les expériences de M. Helmholtz à ce sujet sont concluantes, le timbre est indépendant de la différence de phase, il ne varie que lorsque varient en intensité ou en nombre les sons simples qui réunis donnent le son complexe. Le principe de ces expériences, principe déduit du calcul, peut s'énoncer ainsi ; lorsqu'un diapason vibre devant un tuyau accordé à l'unisson, la différence de phase entre le mouvement du diapason et celui de l'air dépend de la grandeur de l'ouverture du tuyau. On voit

donc que, dans l'appareil décrit précédemment, l'on peut faire varier à volonté les phases de chacun des tuyaux en déplaçant le couvercle qui peut fermer les ouvertures; mais, comme ce déplacement a également pour effet de changer l'intensité, il faut faire varier convenablement la distance du tuyau au diapason de manière à compenser l'un des effets par l'autre. Or, de toutes les expériences qu'il a faites, M. Helmholtz est arrivé à conclure que le *timbre d'un son musical dépend seulement du nombre et de l'intensité des sons partiels, mais non de leurs différences de phase.*

La sensation une et multiple qui produit le timbre ne dépend donc pas, en somme, de la loi du mouvement de chaque molécule, mouvement résultant, mais de chacun des mouvements qui lui donnent naissance quels que soient les rapports de ces derniers entre eux. Cette expérience, jointe à toutes celles qui précèdent permet de déceider entre les idées de Ohm et les objections de Seebeck (1). Ohm avait énoncé la proposition suivante: L'oreille n'a la sensation d'un son simple que lorsqu'elle est soumise à l'action d'un mouvement pendulaire et elle décompose tout autre mouvement périodique de l'air en une série de vibrations pendulaires qui correspondent chacune à la sensation d'un son simple.

La première partie de la proposition n'offre aucune espèce de difficulté; il faut insister au contraire, sur la seconde partie qui exige quelques développements. Nous le répétons, puisque la sensation du timbre est indépendante des différences de phase des sons composants, c'est que ce sont les vibrations composantes mêmes qui

(1) Annales de Poggendorff, vol. LX, LXII et LXIII.

intéressent l'oreille, et non pas leur résultante, puisque celle-ci dépend des rapports des phases. En outre nous devons compléter la démonstration en rappelant le théorème de Fourier en vertu duquel un mouvement périodique quelconque peut toujours être considéré comme la résultante d'un certain nombre de mouvements pendulaires. Ainsi donc, un mouvement périodique peut toujours être décomposé en mouvements pendulaires et l'oreille fait réellement cette décomposition puisque la sensation ne change pas avec les différences de phase.

Les objections de Seebeck, sur lesquelles nous n'insisterons pas du reste, dépendent vraisemblablement de ce qu'il n'avait pas de moyens suffisants d'investigation, ce qui l'a conduit à regarder les valeurs numériques données par l'application de la loi de Ohm comme n'étant pas conformes à l'expérience.

Il faut bien comprendre, du reste, que la question du timbre n'est pas entièrement terminée et que nous aurons à y revenir : l'oreille, en entendant un son complexe, a la sensation des sons simples qui le composent; nous aurons à expliquer comment cette sensation multiple peut être transmise dans son essence complexe au nerf auditif. Mais nous n'aurons pas à rechercher comment la fusion de ces diverses sensations peut se faire pour nous donner la perception du timbre.

XVIII

Lorsque l'on fait entendre simultanément deux sons différents avec une certaine intensité, il peut se produire des phénomènes dont nous devons parler : les *sons résultants, les battements*.

Lorsque l'on fait vibrer deux cordes ou deux tuyaux donnant, par exemple, des notes, *ut* et *sol* dont les nombres de vibrations sont dans le rapport de 2 à 3, on entend le son *ut*, dont le nombre de vibrations serait représenté par 1. L'indication de ces sons appelés sons résultants se trouve d'abord dans Sorge (1). Romieu a communiqué ce fait à l'Académie de Montpellier en 1753; presque en même temps, Tartini (2) en fait mention. La question a été reprise et complètement élucidée. M. Helmholtz a démontré que dans l'audition simultanée de deux sons différents, il se produit toujours un son dont le nombre de vibrations est la différence des nombres de vibrations des deux sons considérés; c'est le son résultant différentiel dont l'existence est facile à reconnaître; mais il existe, paraît-il, et il doit exister en effet un son dont le nombre de vibrations est la somme des nombres de vibrations des sons émis: ces sons présentent de très grandes difficultés pour être nettement reconnus. M. Helmholtz, qui a désigné ces deux sortes de sons sous les noms de *sons résultants différentiels* et *additionnels*, a prouvé par une théorie mathématique complète que le principe de la superposition des petits mouvements qui n'est vrai que dans certaines circonstances, cesse d'être applicable dans la pratique à cause de l'amplitude des vibrations que l'on ne peut supposer infiniment petites, et que les véritables conditions des expériences conduisent à admettre l'existence de deux ondes différentes qui correspondent précisément aux résultats indiqués par l'oreille. Il faut indiquer aussi que le son résultant produit peut donner

(1) *Anweisung zur Stimmung der Orgel werke und des Claviers*, 1744.

(2) *Trattato di Musica*, 1754.

avec chacun des sons initiaux un nouveau son résultant secondaire, qui, à son tour, peut, soit avec l'un des sons réels soit avec un autre son résultant, donner naissance à un son résultant d'ordre plus élevé, l'intensité de ces sons résultants décroît très-rapidement avec leur rang et le premier seul, en général, est directement perceptible.

Ces sons résultants que l'oreille saisit peuvent dans certains cas être renforcés à l'aide de résonnateurs ; cet effet se produira toutes les fois que l'émission de l'une des notes pourra réagir sur l'émission de l'autre, comme lorsque l'un a deux tuyaux accordés à la quinte et montés sur la même soufflerie, comme cela se présente aussi dans la sirène polyphone de Dove dans laquelle l'air s'échappe à la fois par deux séries de trous : cet effet doit encore se manifester dans le cas de deux cordes montées sur une même caisse d'harmonie, les vibrations de l'une pouvant réagir sur celles de l'autre par l'intermédiaire de la caisse sonore. Les sons existent objectivement dans ces divers cas puisqu'ils agissent sur les résonnateurs et cet effet se conçoit : les deux corps vibrants réagissant l'un sur l'autre déterminent dans l'air une onde dont l'existence est prévue par la théorie ; cette onde se superpose à celles des deux corps pour former une onde complexe que l'oreille décomposera en ses éléments pendulaires comme nous l'avons dit.

Mais, lorsque les deux corps sonores n'ont aucune liaison, cette onde additionnelle ne se produit pas, les résonnateurs sont sans influence, et cependant l'oreille entend le son résultant ; le phénomène est subjectif et nous aurons à y revenir pour l'expliquer.

Nous avons dit que des sons simples donnent nais-

sance à plusieurs ordres de sons résultants ; on prévoit la complication qui se présentera lorsque l'on aura en présence deux sons complexes ; car chacun des sons partiels d'une série donnera des sons résultant du premier ordre avec tous les sons partiels de l'autre série ; les sons résultants du second ordre seront encore beaucoup plus nombreux ; mais il faut reconnaître que ces sons résultants se superposeront pour la plupart, soit entre eux, soit même avec les divers sons partiels.

Si deux sons dont la hauteur est très peu différente sont émis simultanément, ils ne pourront donner naissance au phénomène des interférences ; mais ils produisent des *battements*, c'est-à-dire qu'ils font éprouver à l'oreille, outre la sensation simultanée des deux sons, des maxima et des minima d'intensité sonore : les maxima ont reçu le nom de *coups*, ils reviennent périodiquement, et, contrairement à des idées énoncées dans un grand nombre d'ouvrages et qui sont dues à une analyse inexacte et incomplète de causes du phénomène, *le nombre des battements est égal à la différence des nombres de vibrations des sons qui leur ont donné naissance.*

Les battements ont une existence objective, c'est-à-dire que tout corps susceptible de vibrer séparément sous l'influence de chacun des sons prendra par suite de leur existence simultanée un mouvement périodique dont l'amplitude variera entre un maximum et un minimum qui correspondent respectivement au coup de force et au silence presque complet qui lui succède. L'expérience se fait facilement soit à l'aide du phonautographe, soit au moyen des flammes manométriques : les conditions indispensables de la production de ce phénomène sont que les deux sons émis soient assez rapprochés pour que leur combinaison donne une pé-

riode de longue durée relative et dans laquelle la variation d'amplitude entre le maximum et le minimum soit régulière d'une part, et que d'autre part que le corps soit susceptible de vibrer sous l'action des deux sons isolés. Ainsi que nous le verrons, l'oreille est placée dans des conditions qui rendent la production de ce phénomène très-sensible.

Sauveur est le premier qui ait indiqué l'existence de ce phénomène ; il a même proposé de l'employer à la détermination du nombre absolu des vibrations de deux corps sonores en évaluant l'intervalle des sons produits et comptant le nombre de battements par seconde. Soit en effet $\frac{x}{y}$, le rapport du nombre des vibrations de deux sons calculé d'après leur intervalle, et soit m le nombre de battements par seconde, si x et y sont les nombres de vibrations de chacun des sons, on a les équations

$$\frac{x}{y} = \frac{p}{q}$$
$$x - y = m$$

D'où l'on déduit immédiatement.

$$x = \frac{mp}{p-q} \text{ et } y = \frac{mq}{p-q}$$

Les expériences de Sauveur furent reprises par Sarti en présence de l'Académie de Pétersbourg (1796). Enfin plus récemment, Scheibler (1834) en employant une série de 56 diapasons également répartis dans l'intervalle d'une octave parvint à accorder exactement et assez rapidement un instrument quelconque, un piano par exemple ; mais les difficultés de constructions de cet appareil qu'il nommait le *tonomètre* le firent abandonner ; il a été repris assez récemment depuis que les procé

dés de fabrication des instruments d'acoustique se sont perfectionnés.

On ne perçoit bien nettement les battements produits par deux sons que lorsque leur nombre n'est pas très-considerable ; lors même qu'ils sont trop rapides pour qu'il soit possible de les compter, ils peuvent encore donner des sensations nettes. M. Helmholtz rapporte qu'il a pu reconnaître leur existence dans un cas où il devait en exister environ 130 par seconde ; mais à la condition d'arriver graduellement à ce nombre en partant de battements peu fréquents et que l'on puisse distinguer avec une très-grande netteté. Du reste la faculté de perception dépend non-seulement de la différence des nombres de vibrations, mais encore, paraît-il, de leur nombre absolu : la présence de ces battements donne à la sensation un caractère tout particulier.

Une hypothèse due à Thomas Young considère les battements et les sons résultants comme dus à une seule et même cause : la sensation de battement se manifesterait lorsque le nombre des *coups* par seconde serait peu élevé ; lorsque, au contraire, ces battements finissent par devenir de plus en plus rapides, l'oreille fusionnerait les diverses impressions et l'on entendrait un son résultant : cette hypothèse semble justifiée par ce fait que le nombre des battements produits par deux sons simultanés, ainsi que le nombre des vibrations du son résultant, est donné par la différence des nombres de vibrations des sons composants. Mais l'expérience que nous citions précédemment, d'après M. Helmholtz, est en contradiction avec l'hypothèse de Th. Young, car l'oreille aurait dû, sans aucun doute, fusionner les 130 impressions pour faire entendre un son, car ce nombre est bien supérieur à la limite inférieure des sons graves.

Du reste, les causes de ces phénomènes sont en réalité bien différentes : ainsi que nous l'avons dit, les battements sont des maxima dus à la superposition simple des mouvements vibratoires, tandis que les sons résultants correspondent à une onde, causée par l'action simultanée de deux mouvements vibratoires *non pendulaires*, onde qui a une existence propre et dont le mouvement est pendulaire. La différence du mode de perception que l'on reconnaît actuellement entre ces deux phénomènes, différence que nous signalerons plus tard, établit qu'il s'agit de deux phénomènes d'ordre distinct et que l'hypothèse de Young a le tort de réunir.

De même que pour les sons résultants, les phénomènes deviennent plus complexes si l'on fait les expériences en employant les sons fournis par des instruments de musique quelconques ; ces sons présentent, en effet, des harmoniques qui, pris deux à deux, peuvent, s'ils ne sont pas trop distants, donner des battements ; l'un des sons fondamentaux peut également donner naissance à des battements avec un des harmoniques de l'autre son. En outre, les sons résultants peuvent aussi par leur action simultanée donner naissance à des battements avec un des harmoniques de l'autre son. En outre, les sons résultants peuvent aussi par leur action simultanée donner naissance à des battements ; ils peuvent encore en produire avec chacun des sons fondamentaux. Cette remarque explique ce fait de battements entendus distinctement par la production de deux notes trop éloignées pour donner directement naissance à ce phénomène. Ainsi, une octave fausse, correspondant par exemple aux nombres de vibrations 100 et 201, donnera un battement par seconde par

l'action simultanée du son le plus grave, 100, et du premier différentiel, 101.

La question semble devenir plus complexe encore si l'on tient compte à la fois des harmoniques et des sons résultants correspondant à la production simultanée de deux sons musicaux, mais le calcul a prouvé qu'en réalité, les battements des sons résultants se trouvent correspondre exactement aux battements des harmoniques, de telle sorte que leur intensité seule est peut-être augmentée.

M. Helmholtz a étudié avec grand soin les diverses conditions de production des battements à l'aide d'une sirène double montée sur la même soufflerie de telle sorte que les plateaux mobiles font exactement le même nombre de tours : la caisse à vent de l'une de ces sirènes peut tourner, à l'aide d'un pignon et d'une manivelle, autour d'un axe vertical dans un sens ou dans l'autre ; cette rotation a pour effet de faire varier le temps qui s'écoule entre la rencontre d'un même trou du plateau avec deux trous consécutifs du plateau de la caisse, et par suite, de faire varier le nombre de vibrations par seconde : les deux sirènes étant d'abord à l'unisson, la rotation continue de la caisse donnera naissance à un son différent à volonté de ce son initial, tandis que le son de l'autre sirène n'a point varié.

M. Helmholtz a étudié la question des battements avec un soin tout particulier, à cause des conséquences variées qu'il en tire. C'est, en effet, de l'absence ou de la présence de ces battements et de leur nombre absolu que dépendent, suivant cet auteur, la consonnance ou la dissonance de deux notes, c'est-à-dire la propriété que possèdent ces sons émis simultanément de donner lieu à une perception plus ou moins agréable ou désa-

gréable : la sensation de dureté est la plus grande lorsqu'il y a environ 30 battements à la seconde ; mais il n'y a là rien d'absolu, et cette sensation dépend, en outre, de la hauteur des sons ; ce nombre de battements, en effet, peut prendre naissance soit pour l'intervalle très-dissonant *si, ut*, soit pour l'intervalle consonnant *ut, sol*.

La cause de la consonnance a été recherchée, et, depuis Pythagore, a été considérée comme provenant des rapports numériques simples, ainsi qu'il résulte en particulier de certains passages d'Euler (1) et de Descartes (2) ; il en est ainsi, en effet : ce n'est pas à cause de ces rapports simples, mais bien à cause des phénomènes qu'ils produisent ; c'est ce que Sauveur avait prévu, et il assigne les battements comme cause de la dissonance, et l'absence de battements comme correspondant à la consonnance. Ces idées entièrement abandonnées ont été reprises par M. Helmholtz, qui leur a donné un certain degré de probabilité : il en a fait, en outre, la base d'une théorie musicale comprenant non seulement une explication rationnelle de la gamme, mais également une étude très-étendue sur les accords et l'harmonie en général.

Quelque intéressant que puisse être ce sujet, et quels que soient les développements ou discussions, auxquels il soit susceptible de donner naissance, il ne nous est pas possible de nous en occuper ; la nature de la question est très-spéciale, et ce n'est point ici le lieu de la traiter.

(1) Epistola, 154, t. I. — (2) Descartes. Tract. de homine.

III. Oeil et oreille. — Partie III. —
TROISIÈME PARTIE.

Nous avons étudié dans les chapitres précédents les phénomènes principaux que nous sommes susceptibles de percevoir par l'intermédiaire de l'oreille, mais sans nous occuper à aucun point de vue de la manière dont cet organe agit comme récepteur des mouvements vibratoires, et comment nous pouvons comprendre qu'il soit susceptible de faire saisir les modifications nombreuses que nous sommes capables de discerner. Tel est le point de vue auquel nous nous placerons dans cette dernière partie, et cette nouvelle manière d'envisager quelques-uns des phénomènes nous permettra de les comprendre plus complétement.

Nous donnerons d'abord très-sommairement la description de l'oreille, en insistant seulement sur quelques détails importants récemment signalés : nous indiquerons ensuite le rôle probable de chacune de ces parties, et nous chercherons à rendre compte de leur action spéciale dans la perception d'un phénomène acoustique complexe.

L'oreille de l'homme se compose de trois parties que l'on étudie séparément, et qui, d'après leurs positions respectives, ont reçu les noms suivants :

I. Oreille externe, comprenant le pavillon et le conduit auditif externe.

II. Oreille interne ou caisse du tympan dans laquelle se trouve la chaîne des osselets.

III. Oreille interne ou labyrinthe, comprenant le vestibule, le limaçon et les canaux demi-circulaires.

I. Le pavillon est une lame cartilagineuse de forme assez irrégulière, présentant des saillies et des dépressions diverses; il est appliqué suivant une ligne courbe sur les parties latérales et paraît susceptible de faibles mouvements; chez certains animaux ces mouvements peuvent être considérables: le conduit auditif externe est formé par un tube légèrement coudé, à moitié cartilagineux, à moitié osseux; la partie cartilagineuse continue le cartilage du pavillon.

II. La caisse du tympan est une cavité dont les parois sont osseuses pour la plupart; elle est en communication libre avec la partie supérieure de l'arrière-bouche par un conduit étroit, la *trompe d'Eustache*; les parois osseuses présentent, en outre, trois ouvertures fermées par des membranes: la première est mince, circulaire et s'insère sur un anneau osseux, c'est la membrane du tympan qui sépare la caisse du conduit auditif externe qu'elle limite; les deux autres orifices également fermés par des membranes séparent l'oreille moyenne de l'oreille interne; c'est, à la partie supérieure, la *fenêtre ovale*, à la partie inférieure, la *fenêtre ronde*. Enfin, la membrane du tympan est reliée à celle qui ferme la fenêtre ovale par l'intermédiaire des osselets, le *marteau*, l'*enclume*, l'*os lenticulaire* et l'*étrier*; de petits muscles peuvent faire mouvoir, dans de faibles limites, les pièces les unes sur les autres; ces osselets forment une chaîne non interrompue.

III. L'oreille interne est une cavité de forme assez

compliquée et close entièrement ; à l'exception des membranes qui ferment les fenêtres, les parois sont toutes osseuses, elle est tout entière contenue dans le rocher. On la divise en trois portions, le *vestibule*, les *canaux semi-circulaires* et le *limaçon* ; ces trois cavités de forme variable sont remplies de liquide ; une membrane molle qui n'est pas adhérente flotte dans l'eau du vestibule et des canaux semi-circulaires ; elle est reliée aux parois seulement par des fibres nerveuses et des vaisseaux.

Le limaçon présente une double rampe hélicoïdale dont les deux parties réunies à la partie supérieure par une petite ouverture (Hélicotréma) aboutissent par leur autre extrémité, l'une dans le vestibule, l'autre à la fenêtre ronde. La paroi qui sépare les diverses parties de ce canal se compose d'une partie osseuse et d'une partie membraneuse qui, l'une et l'autre, courent dans toute la longueur.

Les parties sur lesquelles nous voulons spécialement insister sont réparties en deux endroits distincts : 1^o Dans le vestibule, les faisceaux des nerfs de l'audition viennent aboutir à diverses ampoules comme aussi dans les canaux demi-circulaires ; les fibres nerveuses se trouvent réparties entre les cellules de l'épithélium qui tapisse ces sortes de tumeurs à leur surface interne : récemment, M. Schultze a découvert dans le vestibule des crins élastiques et roides longs d'environ 0^{mm} 1 qui s'élèvent hors de la surface de cet épithélium ; ils sont fragiles et leur pointe est très-fine ; en d'autres points (il importe peu, à notre point de vue, de spécifier les différences de positions très-exactement, comme s'il s'agissait d'une description anatomique), cet observateur a reconnu qu'il n'existe pas de semblables crins ou

qu'ils sont fort courts, mais on y rencontre des corpuscules calcaires cristallins (otolithes) qui sont implantés dans la membrane des sacs.

2^e La membrane du limaçon offre une disposition plus compliquée qui a été étudiée tout spécialement par le marquis de Corti qui y a reconnu les particularités suivantes ; cette membrane est composée de deux membranes distinctes auxquelles on a donné les noms de membrane *du fond* (*membrana basilaris*) qui semble être assez élastique et de *membrane supérieure de Corti* ; ces membranes comprennent un certain intervalle qui a reçu le nom de rampe moyenne du limaçon ; cette cavité qui est constamment comprise entre la rampe du vestibule et la rampe du tympan présente dans toute la longueur de son bord interne et de son bord externe de grosses cellules sphériques transparentes qui semblent manquer entièrement dans la partie moyenne ; dans cette dernière on distingue des fibres de deux sortes qui sont les *arcs* ou *fibres de Corti* et qui sont rangées en très-grand nombre (plusieurs milliers) parallèlement dans toute la longueur du limaçon ; les fibres de la première série ou ascendantes sont des prolongements de la membrana basilaris qui se relèvent et présentent à leur partie supérieure une sorte de point d'attache auquel sont fixées les fibres de la 2^e série qui sont des cordons cylindriques lisses et flexibles ; l'extrémité inférieure s'épanouit et vient se fixer sur la *membrana basilaris* à la partie moyenne environ. La rampe moyenne comprend en outre un assez grand nombre d'autres filets ou appendices de diverses natures parmi lesquels on distingue un grand nombre de fibres ou cellules nerveuses, sans que l'on puisse dire cependant si, comme le voulait

Kölliker, elles sont la continuation même des fibres de Corti.

Il résulte de cette description que nous avons réduite aux parties absolument essentielles, que, à leur extrémité, les nerfs de l'audition sont en relation intime avec les organes découverts par Corti et dont nous chercherons à expliquer plus loin les propriétés et le mode probable d'action.

Le nerf auditif étant le seul capable de transmettre au cerveau la sensation du son, sensation que nous supposerons dans tout ce qui va suivre uniquement produite par les vibrations d'un corps sonore, l'étude du mode d'action de l'organe de l'ouïe comprendra l'indication du rôle que jouent les diverses parties de cet organe dans la transmission des vibrations, de l'air ou d'un corps élastique extérieur aux derniers éléments nerveux; nous ferons cette étude en suivant l'ordre même de communication du mouvement vibratoire.

II

Si l'existence d'un nerf auditif peut seule nous faire comprendre la production du son, nous pouvons parfaitement admettre que l'oreille peut être notablement modifiée ou presque supprimée, comme nous l'indiquerons dans quelques classes d'animaux sans que l'ouïe cesse d'exister; il suffit que des vibrations puissent être transmises au nerf auditif.

Ce mode de transmission plus ou moins directe au nerf acoustique, mais sans l'intermédiaire de l'oreille, peut être rendu très-manifeste par plusieurs expériences, dont voici les principales:

Si l'on place dans la bouche entr'ouverte une montre

Gariel.

12

qui ne touche à aucune partie solide, on n'entend absolument aucun son, aucun bruit; le tic-tac devient très-net, au contraire, si on la met en contact avec les dents, la communication des vibrations s'effectuant jusqu'au nerf par les parties solides de la mâchoire et du crâne.

Cette expérience peut être variée de la manière suivante: l'oreille étant hermétiquement bouchée à l'aide de cire à laquelle on a donné préalablement la forme du conduit auditif, on n'entend en aucune façon le bruit d'une montre même placée à très-petite distance tandis que ce bruit devient perceptible lorsque la montre est mise en contact avec les parois du crâne.

Les sons peuvent même dans ce mode de transmission acquérir une intensité remarquable. Pour le prouver, les oreilles étant bouchées absolument on passe autour de la tête une ficelle que l'on applique avec les mains et à laquelle est attachée une tige métallique qu'on laisse pendre; en frappant la tige avec un morceau de métal, on éprouve une sensation sonore d'une très-grande puissance.

Il résulte en particulier de cette dernière expérience que lors de la production dans l'air d'un son assez intense, outre la transmission par l'oreille il doit s'en produire une plus directe par la boîte osseuse même de la tête. Cet effet est sans doute peu sensible dans l'air, à cause de la faible densité de ce milieu, mais il doit prendre une importance plus considérable lorsque l'on a la tête plongée sous l'eau.

Abordons maintenant l'audition par l'oreille dans les conditions normales.

La première partie dont on ait à s'occuper est le pavillon, ce cartilage à forme irrégulière. Diverses fonc-

tions lui ont été attribuées ; suivant quelques auteurs, les diverses cavités et éminences que l'on observe seraient disposées de telle sorte qu'elles renverraient dans le canal auditif par réflexion au moins une partie de toute onde incidente, quelle que fût sa direction. Mais, outre qu'au point de vue géométrique la forme ne satisfait pas aux meilleures conditions, la nature cartilagineuse du pavillon le rend peu propre à jouer le rôle de surface réfléchissante. D'autres physiologistes, s'appuyant sur ce que l'on observe dans certains animaux qui dirigent leurs oreilles du côté d'où vient le bruit, et sur ce que le pavillon contient quelques muscles, lui ont attribué la propriété de varier de forme de manière à diriger la plus grande quantité d'air en mouvement vers le canal auditif. Mais, ici encore, la nature cartilagineuse semble le rendre peu propre à remplir cette fonction, et d'ailleurs les exemples de personnes faisant mouvoir à volonté leurs oreilles sont fort rares et les mouvements sont toujours très-peu étendus.

Il nous semble que l'opinion suivante émise par Savart est plus conforme à la disposition de cette partie extérieure : d'après cet auteur, le pavillon vibrerait lui-même en totalité par communication des vibrations de l'onde, et il paraît éminemment propre à cette action par son étendue et sa position presque entièrement séparée de la tête. Il transmettrait à son tour les vibrations au cartilage du canal auditif, puisqu'ils sont continus, et ce cartilage à son tour agirait, comme nous allons le dire, sur la membrane du tympan sur laquelle tout d'abord vont venir se concentrer également les vibrations que transmet incontestablement le canal auditif.

Le canal auditif agit pour transmettre à la mem-

brane du tympan les vibrations de l'air d'abord par la colonne d'air qu'il renferme et dans lequel l'ébranlement se propage sans difficulté et sans variation d'intensité ; cette action est incontestable, car on diminue bien nettement la netteté de la sensation en plaçant dans ce canal un petit tampon de ouate qui s'oppose au libre déplacement de l'air ; mais d'après Muller et les frères Weber, cette action n'est pas la seule et la transmission s'effectue également par les parois cartilagineuses et osseuses : non-seulement ces parois transmettraient comme nous l'avons dit les vibrations du pavillon, mais aussi celles de l'air extérieur même. Enfin ce canal peut agir pour ainsi dire comme résonateur, c'est à dire que l'air qu'il renferme, peut sous l'influence de certains sons, entrer lui-même en vibrations et renforcer notamment les sensations correspondantes. C'est probablement à cette action que l'on doit rapporter la cause de la sensation spéciale que produisent en général les sons ou les harmoniques des notes compris entre *mi₅* et *sol₅*, ce canal étant lui-même accordé à cette hauteur.

Des actions simples ou multiples du canal auditif externe, il résulte en somme que les vibrations sont transmises au tympan qui en sa qualité de membrane est apte à vibrer sous l'influence d'un très-grand nombre de sons ; probablement même par des variations de tension le nombre des sons auxquels elle est sensible doit être considérablement augmenté. Cette membrane est donc, en somme l'intermédiaire obligé, dans l'audition normale, entre l'air et les parties profondes de l'oreille. L'intensité de cette transmission dépend également de la tension, et il résulte des expériences de Muller que

nous avons citées qu'elle diminue quand la tension augmente; l'expérience directe peut se faire en tendant cette membrane, ce que l'on obtient en faisant passer, par la trompe d'Eustache, dans la caisse du tympan une certaine quantité d'air en faisant une expiration la bouche fermée et le nez bouché ; dans ces conditions l'ouïe possède incontestablement une sensibilité très-diminuée. Le muscle tenseur du tympan par son action peut donc diminuer l'intensité des vibrations transmises qui pourraient occasionner une sensation désagréable et même douloureuse pour des sons très-forts. Il paraît vraisemblable que, comme le pense Muller, ce muscle est mis en action inconsciemment et par mouvement réflexe, comme cela se produit pour l'iris dans l'œil.

Cette question de l'influence de la tension du tympan est en somme complexe, car la diminution d'intensité est fort variable suivant la hauteur du son produit; ce qui s'explique assez bien cependant, en remarquant que si la membrane tendue est moins apte à transmettre simplement les vibrations, elle est au contraire mieux disposée pour entrer elle-même en mouvement; or, l'action sur l'oreille interne est la même quelle que soit la cause de la vibration du tympan.

A cette question de la tension du tympan se rapporte très vraisemblablement l'usage de la trompe d'Eustache; à l'égard de ce canal, les opinions les plus diverses ont été enseignées : c'était par son intermédiaire, pensait-on, qu'on entend le son de sa propre voix; mais toutes les idées qu'on avait émises *à pricri*, ont été démontrées fausses par l'expérience. Le véritable usage de la trompe d'Eustache semble être de maintenir l'équilibre de pression entre l'air de la caisse du tympan et l'air extérieur,

afin d'empêcher toute tension passive du tympan, pouvant diminuer sa sensibilité. Carus raconte à l'appui de cette opinion le fait suivant : dans une ascension de montagne il éprouvait une certaine tension dans l'oreille ; cette sensation disparaissait lorsqu'il avait monté de 200 mètres environ, à l'instant où il entendait un craquement qu'il suppose produit par la sortie de l'air de la caisse du tympan. Des faits analogues ont maintes fois été signalés après un séjour dans une cloche à plongeur, dans une atmosphère d'air comprimé.

Cette hypothèse sur le mode d'action de la trompe d'Eustaché, n'est du reste nullement en contradiction avec les faits pathologiques de surdité arrivés à la suite d'obturation de ce canal : cette obturation, empêchant l'équilibre de s'établir, doit amener, en effet, une dureté plus ou moins grande de l'ouïe.

Les vibrations du tympan doivent être communiquées à l'oreille interne et deux voies seulement peuvent servir ; ces vibrations peuvent se transmettre par l'air agissant sur la fenêtre ronde, ou par l'intermédiaire des osselets mettant en mouvement la fenêtre ovale.

Certains physiologistes ou anatomistes ont pensé que la communication des vibrations a lieu exclusivement par l'intermédiaire de l'air agissant sur la fenêtre ronde ; on peut citer comme ayant partagé cette opinion Caldani, Cheselden, Asiley Cooper, Scarpa qui s'appuyaient sur des observations de personnes chez lesquelles la chaîne des osselets avait été détruite en totalité ou en partie sans que la faculté d'entendre eût été perdue.

Muncke et Muller ont pensé que les deux membranies qui ferment les deux fenêtres servent à la transmission des vibrations au liquide labyrinthique, la communica-

tion se faisant à la fois par l'air et les osselets mais d'une manière plus intense par ceux-ci. Muller a même reproduit schématiquement les conditions de la caisse du tympan, des trois membranes qui s'y trouvent et du conducteur solide qui en réunit deux, et il en tirait des conclusions conformes aux conclusions que nous venons d'énoncer.

Quelques savants enfin ont nié toute action de communication par la fenêtre ronde, et parmi ceux-ci Haller et Lincke; il faut y joindre aussi le D^r Auzoux, qui a donné une explication entièrement satisfaisante de l'action de la membrane qui c'est la fenêtre ronde (membrane secondaire du tympan) que nous allons bientôt indiquer.

C'est cette dernière opinion que nous admettons, et sans entrer dans les détails de transmission par chacun des osselets, nous dirons donc que tout l'ébranlement du tympan est transmis à la fenêtre ovale et au liquide labyrinthique par l'intermédiaire de la chaîne des osselets. Dans cette transmission, ainsi qu'il résulte d'un schéma de Savart, le sens des vibrations est conservé,

On peut remarquer incidemment que le mode de communication de l'air à l'eau contenue dans l'oreille interne, (communication par membrane placée dans un seul milieu, corps solide qui y est fixé et nouvelle membrane séparant un gaz d'un liquide et transmettant à celui-ci les vibrations du solide) est parfaitement analogue à celui que Muller considère, d'après ses expériences précédemment rapportées, comme affaiblissant le moins possible l'intensité du son transmis.

L'oreille interne formant une cavité entièrement fermée et dont les parois osseuses sont dénudées complètement.

ment d'élasticité, à l'exception des membranes des fenêtres, et l'eau qui remplit complètement cette cavité étant incompressible, ce liquide ne pourra prendre un mouvement vibratoire que si, tandis qu'il subit une secousse en un point, la fenêtre ovale, il ne se trouve quelque part un élément de paroi qui puisse céder. Tel est vraisemblablement le rôle de la fenêtre ronde : permettre, par son élasticité, le mouvement du liquide labyrinthique que tendent à produire les secousses communiquées par la membrane de la fenêtre ovale ; la fenêtre ronde n'a donc, en somme, dans l'audition qu'un rôle purement passif.

La détermination de la part que prend, dans l'audition, chacune des parties de l'oreille interne est fort difficile et ne peut être bien précisée. La forme très-complexe de ces organes ne permet guère nettement de se rendre compte de la manière dont ils agissent. Les canaux demi-circulaires qui sont placés dans trois plans perpendiculaires ont exercé en particulier l'imagination de plusieurs auteurs qui leur ont attribué, entre autres rôles, celui de déterminer la direction de l'ébranlement et celui de recueillir les ondes provenant des os de la tête ; ce dernier rôle, suivant E. et H. Weber, appartient au contraire au limaçon dont la colonne osseuse et les lames semblent en effet très-propres à transmettre des vibrations.

Nous le répétons, nous ne chercherons point à établir des distinctions analogues, mais nous nous bornerons à remarquer que la disposition des diverses pièces permet d'étaler sur une large surface en contact avec un liquide les fibres nerveuses élémentaires.

Quel est enfin le rôle que nous devons attribuer aux

éléments microscopiques que nous avons décrits précédemment et qui constituent définitivement la partie sensible de l'oreille. Le liquide labyrinthique mis en mouvement vibratoire, comme nous l'avons indiqué précédemment, agit sur toute la partie membraneuse du labyrinthe qu'elle fait participer à son mouvement. Cette partie membraneuse supporte des crins raides et élastiques d'une part, des fibres tendues d'autre part, susceptibles les uns et les autres d'entrer en vibration sous l'influence du mouvement du liquide qui les baigne ou qui agit sur les membranes auxquelles ils sont fixés; ces verges élastiques microscopiques, ces cordes susceptibles de vibrer agissent enfin sur les fibres nerveuses élémentaires, soit directement en les ébranlant, soit en mettant en mouvement les otolithes qui, par leur choc, agissent aussi sur ces fibres; de l'une ou de l'autre façon, les fibres sont excitées, leur activité est mise en jeu et fait percevoir la sensation du son sans que nous ayons, à cet égard, à expliquer autre chose que cette action sur les éléments nerveux.

III

S'il ne nous appartient pas de rechercher comment en dernier lieu se produit le son, nous avons cependant à faire comprendre comment les modifications du mouvement vibratoire peuvent correspondre à des variations dans la mise en action du nerf.

Avant la découverte des fibres de Corti, avant l'hypothèse que fait à leur égard M. Helmholtz, hypothèse analogue à celle de Young sur les couleurs, la théorie de l'audition était simple, mais peu complète et peu satisfaisante. Le nerf auditif était considéré dans son ensem-

ble comme baigné dans le liquide du labyrinthe aux divers mouvements duquel il participait; tout ébranlement de l'air se communiquait par le tympan, les osselets et l'eau labyrinthique jusqu'à ce nerf qui était affecté de manières différentes par toutes les modifications de ces ébranlement: rapidité, intensité, forme, etc. Cette théorie était simple et pouvait en somme se résumer comme nous venons de le faire. Mais les objections étaient graves et nombreuses. Comment un même nerf pouvait-il donner naissance à une variété de sensations si considérable, fait peu concordant avec le mode d'action des nerfs qui est assez restreint pour chacun d'eux? comment expliquer l'audition simultanée de plusieurs sons? et d'autres encore.

Nous allons exposer maintenant la théorie de l'audition telle que la donne M. Helmholtz.

Les fibres de Corti sont telles que chacune d'elles est susceptible de prendre un mouvement vibratoire déterminé qui varie de l'une à l'autre et qui correspond à l'un des sons perceptibles; il y aurait ainsi, en les supposant également réparties, 400 fibres pour chaque octave, 35 environ pour chaque demi ton. Chacune de ces fibres est donc susceptible de vibrer par influence lorsque l'on émet le son simple qui lui correspond; elle vibre aussi, mais avec moins de force lorsque l'on produit non pas ce son même, mais un son voisin. Enfin l'ébranlement de chacune des fibres met en jeu l'énergie d'un certain filet nerveux qui donne toujours naissance à la même sensation.

Ces hypothèses parfaitement rationnelles suffisent pour expliquer tous les faits que l'expérience a indiqués et que nous avons résumés, dans le précédent chapitre.

L'action d'un son simple compris dans les limites de l'échelle des sons perceptibles fait entrer en vibrations énergiques la fibre qui lui correspond exactement, s'il y en a une, et également, mais avec moins de force, quelques-une des fibres voisines. L'ensemble des sensations correspondants aux divers filets nerveux ébranlés nous donne une perception unique à cause de leur identité presque absolue ; si le son simple ne correspond pas exactement à une fibre, il mettra en vibrations assez fortement les deux fibres les plus voisines et moins énergiquement les fibres plus éloignées : il y aura donc un ensemble très-semblable au précédent, et comme dans ce dernier cas, perception unique et pour la même raison.

Dans les explications qui vont suivre je supposerai qu'il y a toujours une fibre vibrant à l'unisson des sons simples émis ; si cela n'était pas, il suffirait de considérer comme précédemment les deux fibres les plus voisines, et les conséquences seraient absolument les mêmes.

Supposons qu'il y ait production de plusieurs sons simultanés, que ces sons soient les harmoniques d'un même son complexe ou qu'ils proviennent de notes réellement différentes. Chacun des sons simples fera vibrer avec force la fibre qui lui correspond et plus faiblement les fibres voisines en produisant la sensation particulière qui correspond à l'ensemble des actions des filets nerveux mis en action ; nous pouvons donc ainsi avoir la perception de tous les sons simples émis simultanément et chacun avec son intensité propre, puisque le mouvement de chaque fibre dépend de l'intensité du son correspondant. Ce n'est que par une opération toute intellectuelle et psychologique que nous arrivons à fu-

sionner ces caractères isolés et à en former le caractère du timbre; aussi, lorsque par un effort d'attention nous cherchons à entendre isolément un de ces sons, la perception de ce son reste seul, celle du timbre disparaît. L'explication du phénomène des battements est la suivante : lorsque l'on produit deux sons peu différents, il arrive généralement que la fibre qui correspond exactement à l'un des sons et qui vibrera sous son influence vibrera quoique moins fortement sous l'influence du son concomitant; cette superposition sur un même corps de vibrations peu différentes donnera naissance à cette période relativement longue de croissance et de décroissance des amplitudes, et à cette production de maxima et de minima qui correspondrait à des variations toutes semblables dans l'activité de la fibre nerveuse : cette action, bien entendu, s'exercera tout aussi bien sur les quelques fibres voisines qui sont susceptibles de vibrer également sous l'influence des deux sons émis; on comprend que des sons trop différents ne peuvent donner de battements, puisqu'une fibre vibrant sous l'influence de l'un de ces sons ne saurait vibrer sous l'influence de l'autre. Enfin cette même explication des battements a conduit M. Helmholtz à donner une raison plausible de l'effet désagréable des dissonances qu'il attribue, nous l'avons dit, aux battements : il rappelle les effets également désagréables produits sur l'œil par une lumière vacillante et présentant de nombreuses variations d'éclat; sur le sens du toucher par des excitations intermittentes comme dans le chatouillement, et il conclut que notre système nerveux est moins fatigué par une impression continue que par une impression intermittente qui devient dès lors et promptement une cause de sensibilité et de fatigue des nerfs.

sations désagréables : le phénomène des battements sur le nerf auditif aurait le même effet et causerait la sensation peu agréable de dissonance.

Enfin, pour terminer cette question, examinons ce qui se passe lors de la production d'un son résultant ; supposons d'abord que ce son soit objectif, qu'il soit produit réellement par la réaction des deux corps sonores l'un sur l'autre ; dans ce cas, il doit résulter d'après la théorie mathématique qu'en a donnée M. Helmholtz, outre deux mouvements pendulaires correspondant aux sons émis, un autre mouvement pendulaire dû à ce que les mouvements vrais des corps sonores ne sont pas pendulaires ; il y aura donc trois ondes différentes ; chacune d'elles ébranlera une fibre de Corti et fera entendre un son. Si le son résultant n'est pas objectif, si les corps sonores ne réagissent pas l'un sur l'autre, les conditions semblent différentes et cependant la sensation est tout à fait la même que précédemment ; on peut se regarder comme étant en droit d'admettre qu'avant d'arriver à l'oreille interne les mouvements vibratoires avaient pu réagir l'un sur l'autre pour se retrouver dans les mêmes conditions que précédemment ; dans ce cas, ce sera en se superposant sur la membrane du tympan que ces deux mouvements non pendulaires auraient donné naissance à cette troisième onde qui, de cet instant, aurait eu une existence réelle et aurait pu agir sur les fibres de Corti. Ajoutons que c'est à la réaction de la membrane du tympan animée de ce mouvement complexe sur l'air du résonnateur que M. Helmholtz attribue le léger renforcement qu'il a observé dans ce cas et qui ne devrait pas exister puisque le son résultant n'existe pas dans l'air.

alors, en fonction de : soldats dans des canotiers
et bateaux de la flotte en mer. IV.

Pour terminer ce qui nous reste à indiquer sur l'audition, nous voulons donner quelques aperçus sur les appréciations fournies par l'oreille.

Nous avons déjà traité une partie de la question au sujet de l'intensité des sons et nous avons dit que les appréciations offrent à cet égard peu d'exactitude; il paraît résulter d'expériences faites par MM. Renz et Wolf (1), que l'oreille est incapable de discerner des sons dont les intensités sont dans le rapport de 9 à 10.

L'évaluation de la direction est également peu satisfaisante, ou plutôt elle n'existe pas autrement que par un jugement; Venturi (2), rapporte que l'une des oreilles étant bouchée, et les yeux bandés, le son paraît toujours venir dans la direction de l'oreille ouverte; mais si l'on déplace la tête ou si le corps sonore se meut, on évalue la position du corps sonore par la direction de l'oreille ouverte lors de la sensation d'intensité maxima; lorsque les deux oreilles sont ouvertes, on a une notion sur la direction par la différence d'intensité des sensations perçues.

Mais les évaluations des sons en tant que hauteur sont très précises et l'oreille peut acquérir une délicatesse extrême par l'exercice. Weber dit que l'on peut distinguer la différence de deux sons dont les nombres de vibration sont dans le rapport de 1000 à 1001; Seebeck allait même plus loin et assigne comme limite

(1) Versuche über die Unterscheidung verschiedenster Schallstärken, in Vierordt's Archiv, 1856.

(2) Magasin de Voigt.

une différence de $\frac{1}{1200}$; mais pour arriver à ces résultats extrêmes, il importe que les sons aient aussi exactement que possible même timbre et même intensité.

Enfin l'oreille est également un très bon juge au point de vue de la succession des phénomènes acoustiques ; il paraît parfaitement prouvé qu'un différence de $\frac{1}{100}$ de seconde entre la production de deux sons est encore sensible ; mais il y a là une question d'organisation et d'habitude qui présente sans doute une grande importance.

V.

La faculté d'entendre dépend uniquement ainsi que cela résulte de toutes les considérations qui précèdent, de l'existence d'un nerf spécial destiné à l'audition, les diverses pièces qui constituent l'oreille n'ayant en somme comme on a pu le voir qu'une rôle relativement secondaire. C'est ce que va prouver encore une indication très rapide et très sommaire des modifications que présente l'organe de l'ouïe dans la série animale ; nous nous bornerons simplement à noter les différences capitales et caractéristiques.

Chez les *oiseaux* l'oreille ne diffère guère de celle de l'homme et des autres mammifères que par l'absence du pavillon : en outre la caisse du tympan a une plus grande capacité, et le limaçon est peu développé.

Les *reptiles* sont entièrement dénus d'oreille externe, la membrane du tympan est à fleur de tête : chez quelques uns (protée, axolotl) la caisse du tympan manque ainsi que le limaçon.

L'oreille des *poissons* est réduite à l'oreille interne qui le plus souvent même est incomplète.

Les *articulés* semblent n'avoir aucun organe auditif; ils sentent seulement peut-être les vibrations de l'air, mais alors ils *n'entendent pas*.

Chez les *crustacés* et les *mollusques* l'oreille se réduit à une poche spéciale remplie de liquide, contenant souvent quelques parties pierreuses d'un certain volume et sur les parois de laquelle s'épanouit un nerf spécial.

Chez les *crustacés* et les *mollusques* l'oreille se réduit à une poche spéciale remplie de liquide, contenant souvent quelques parties pierreuses d'un certain volume et sur les parois de laquelle s'épanouit un nerf spécial.

Chez les *crustacés* et les *mollusques* l'oreille se réduit à une poche spéciale remplie de liquide, contenant souvent quelques parties pierreuses d'un certain volume et sur les parois de laquelle s'épanouit un nerf spécial.

Chez les *crustacés* et les *mollusques* l'oreille se réduit à une poche spéciale remplie de liquide, contenant souvent quelques parties pierreuses d'un certain volume et sur les parois de laquelle s'épanouit un nerf spécial.

Chez les *crustacés* et les *mollusques* l'oreille se réduit à une poche spéciale remplie de liquide, contenant souvent quelques parties pierreuses d'un certain volume et sur les parois de laquelle s'épanouit un nerf spécial.

Chez les *crustacés* et les *mollusques* l'oreille se réduit à une poche spéciale remplie de liquide, contenant souvent quelques parties pierreuses d'un certain volume et sur les parois de laquelle s'épanouit un nerf spécial.

Chez les *crustacés* et les *mollusques* l'oreille se réduit à une poche spéciale remplie de liquide, contenant souvent quelques parties pierreuses d'un certain volume et sur les parois de laquelle s'épanouit un nerf spécial.

NOTES ADDITIONNELLES

Note A.

DE LA PROPAGATION D'UN ÉBRANLEMENT DANS UNE COLONNE DE GAZ INDÉFINIE.

Considérons deux tranches voisines M et N situées à des distances d'une origine fixe x et $x + d$; soient u et u' les déplacements respectifs de ces tranches; u et u' sont fonction de ces distances à l'origine, on a donc :

$$u' = u + \alpha \frac{du}{dx} + \frac{\alpha^2}{1.2} \frac{d^2u}{dx^2} + \text{etc.}$$

D'où en négligeant les infiniment petits du 2^e ordre

$$u' = u - \alpha \frac{du}{dx}$$

Les deux tranches séparées d'abord de α , le sont maintenant de α' et l'on a :

$$\alpha' = \alpha + u' - u = \alpha \left(1 + \frac{du}{dx} \right)$$

Soient D et D' les densités de la masse de gaz comprise entre ces tranches aux deux instants considérés ; on a :

$$\frac{D}{D'} = \frac{x'}{x} = 1 + \frac{du}{dx}$$

Si p et p' sont les pressions sur la tranche M dans les mêmes conditions, on a $\frac{p'}{p} = \frac{D}{D'} = 1 + \frac{du}{dx}$

D'autre part, si p'' est la pression sur la tranche N après le déplacement, on a

$$p'' = p' + \alpha \frac{dp'}{dx} + \frac{\alpha^2}{4} \frac{d^2p'}{dx^2} + \text{etc}$$

$$p'' = p \left(1 - \frac{du}{dx} - \alpha \frac{d^2u}{dx^2} - \frac{\alpha^2}{4} \frac{d^3u}{dx^3} - \text{etc.} \right)$$

Gabriel

La couche de gaz considérée est soumise à une force égale à la différence des premiers $p' - p''$, qui se réduit à

$$p \approx \frac{d^2u}{dx^2}$$

La masse de gaz est αD ; $\frac{d^2u}{dt^2}$ est son accélération, il vient donc :

$$D \frac{d^2u}{dt^2} = p \frac{d^2u}{dx^2}$$

Si nous posons enfin pour simplifier l'écriture

l'équation différentielle est

$$\frac{d^2u}{dt^2} = a \frac{d^2u}{dx^2} + b = 0$$

On sait que l'intégration conduit à la formule

$$u = F(x + at) + f(x + at)$$

dans laquelle les fonctions arbitraires F et f sont déterminées par les conditions initiales. On la remplace par l'équation

$$u = \frac{1}{2} \varphi(x + at) + \frac{1}{2} \varphi(x - at) + \frac{1}{2a} \int_{x - at}^{x + at} \Psi(z) dz$$

La fonction φ est telle que $u = \varphi(x)$ donne les déplacements à l'instant initial et la fonction Ψ est telle que $\frac{du}{dt} = \Psi(x)$ donne la vitesse de chaque tranche au même instant.

Supposons le cas d'un ébranlement initial limité à une distance l de l'origine ; dès lors les fonctions φ et Ψ sont nulles pour toutes les valeurs de la variable non comprises entre 0 et l . Etudions ce qui se passe dans la partie positive et considérons seulement des points en dehors de l'ébranlement initial ; alors on a

$$x > l \quad \text{et} \quad t > 0$$

Dans ces conditions $\varphi(x + at)$ est toujours nulle car $x + at > l$.

La fonction $\varphi(x - at)$ est nulle tant que l'on n'a pas

$$\text{ou} \quad \begin{aligned} 0 < x - at < l \\ \frac{x - l}{a} < t < \frac{x}{a} \end{aligned}$$

Le terme $\int_{x-at}^{x+at} \Psi(z) dz$ est l'aire de la courbe $z=\Psi(t)$ qui n'existe qu'entre 0 et 1 .

Si l'on prend $t_1 < \frac{x-1}{a}$, on aura

$$x - at_1 > 1 \quad \text{et à fortiori} \quad x + at_1 > 1$$

Ce terme ne donnera donc aucune valeur jusqu'à la limite $t = \frac{x-1}{a}$

Si l'on prend au contraire $t_2 > \frac{x}{a}$ on aura

$$x - at_2 < 0 \quad \text{et} \quad x + at_2 > 1$$

ces limites comprendront toujours la courbe entière et le terme $\int_{x-at}^{x+at} \Psi(z) dz$ conservera une valeur constante.

Par suite, dans les limites que nous nous sommes imposés, on voit que le déplacement u d'un point situé à une distance x de l'axe est nul tant que l'on n'a pas $t = \frac{x-1}{a}$; qu'à partir de cet instant et jusqu'à $t = \frac{x}{a}$ la valeur de u varie et qu'au delà de cette limite u prend et conserve une grandeur constante :

Que par conséquent le mouvement de chaque molécule ne dure qu'un temps limité et constant $T = \frac{x}{a} - \frac{x-1}{a} = \frac{1}{a}$.

Que le temps écoulé depuis l'ébranlement initial jusqu'à l'instant où cet ébranlement arrive à la distance x de l'origine est proportionnel à x ; c'est-à-dire que le mouvement de propagation de l'ébranlement est uniforme.

Note B.

DU MOUVEMENT PENDULAIRE.

Supposons un corps dérangé de sa position d'équilibre et qui tend à y revenir en vertu d'une force proportionnelle à la distance à cette position, comme c'est le cas d'une verge élastique encastrée à une extrémité, libre à l'autre, et à laquelle on a fait subir un déplacement assez petit par rapport à sa longueur pour que l'on puisse la considérer comme restant parallèle à elle-même.

Prenons la position d'équilibre pour origine; soit a la distance initiale de la verge au moment où on l'abandonne, et soit x sa distance au bout d'un temps t ; soit enfin m la masse en mouvement, et k un coefficient constant dépendant de l'élasticité du corps.

La relation entre la force et l'accélération permet d'écrire immédiatement l'équation :

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx$$

équation différentielle qu'il faut intégrer. Il vient après avoir multiplié par $2dx$:

$$m \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 = -kx^2 + C$$

$\frac{dx}{dt}$ est la vitesse; elle est nulle au moment du départ du mobile pour $x = a$, donc la constante est égale à ka^2 , et l'on a

$$m \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 = k (a^2 - x^2)$$

ou

$$mv^2 = k (a^2 - x^2). \quad (1)$$

En résolvant par rapport à dt , il vient :

$$dt = \sqrt{\frac{m}{k}} \sqrt{\frac{dx}{a^2 - x^2}}$$

et en intégrant encore une fois

$$t = \sqrt{\frac{m}{k}} \arccos \frac{x}{a}$$

car la constante est nulle en exprimant que pour $x = a$ on a $t = 0$.

De cette équation, on tire :

$$x = a \cos t \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

En dérivant cette équation par rapport à t , on a :

$$v = a \sqrt{\frac{k}{m}} \sin t \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3)$$

Ces deux dernières équations définissent complètement le mouvement : on voit que la courbe des vitesses en particulier est une sinusoire.

Note C.

SUR LE PRINCIPE DE LA SUPERPOSITION DES PETITS MOUVEMENTS.

Nous avons vu que le mouvement de l'air dans un tuyau indéfini est donné par l'équation aux différences partielles :

$$\frac{d^2 u}{dt^2} = a^2 \frac{d^2 u}{dx^2}$$

Supposons que l'on ait plusieurs fonctions u_1, u_2, u_3, \dots , satisfaisant

séparément à cette équation et telles que chacune corresponde à une position initiale déterminée du fluide, de telle sorte que l'on ait

$$\frac{d^2 u_1}{d t^2} = a^2 \frac{d^2 u_1}{d x^2} \text{ et que pour } t=0 \text{ on ait } u_1 = \varphi_1(x), \frac{d u_1}{d t} = \psi_1(x)$$

$$\frac{d^2 u_2}{d t^2} = a^2 \frac{d^2 u_2}{d x^2} \text{ et que pour } t=0 \text{ on ait } u_2 = \varphi_2(x), \frac{d u_2}{d t} = \psi_2(x)$$

Je dis que la fonction $u = u_1 + u_2 + \dots$ est également une solution de la question car on a $\frac{d^2 u}{d t^2} = \frac{d^2 u_1}{d t^2} + \frac{d^2 u_2}{d t^2} + \dots$

et aussi

$$\frac{d^2 u}{d x^2} = \frac{d^2 u_1}{d x^2} + \frac{d^2 u_2}{d x^2} + \dots$$

Si d'autre part on fait $t=0$, on aura, en appelant $\varphi(x)$ les valeurs correspondantes de u et de $\frac{du}{dt}$:

$$\varphi(x) = \varphi_1(x) + \varphi_2(x) + \dots$$

$$\psi(x) = \psi_1(x) + \psi_2(x) + \dots$$

Si donc dans le tuyau indéfini, on suppose divers états initiaux et les mouvements correspondants pour un certain point; si d'autre part, on considère un ébranlement initial qui soit la somme des ébranlements précédents, le mouvement correspondant d'un point s'obtiendra précisément en faisant la somme des mouvements qui lui auraient été communiqués dans chacun des cas précédents.

Ce principe qui s'applique également à la propagation dans un milieu indéfini a reçu le nom de principe de la superposition des petits mouvements.

Note D.

Nous pensons que l'on pourra se rendre compte avec plus de facilité du phénomène dont nous parlons, à l'aide des deux figures suivantes qui montrent dans des cas simples la forme que prend une corde lorsqu'un mouvement vibratoire partiel vient s'ajouter au mouvement de totalité.

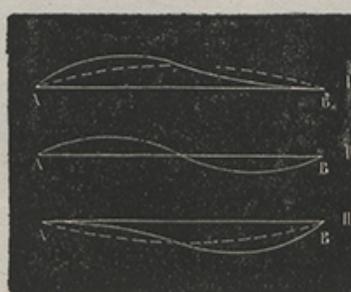


Fig. I.

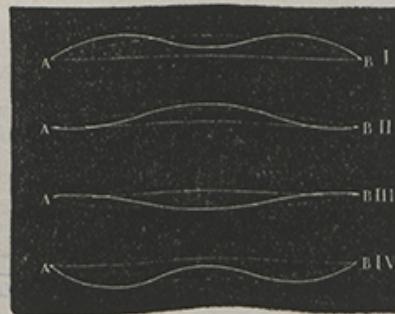


Fig. II.

La Figure I montre les positions d'une corde qui rend à la fois le son fondamental et son 1^{er} harmonique, son octave ; les positions I, II et III représentent cette corde au commencement au milieu et à la fin d'une oscillation simple.

La figure II, montre une corde qui fait entendre une note et sa douzième (quinte de l'octave) ; les diverses positions indiquent la forme de la corde pour chaque tiers de demi-oscillation.

Dans les deux figures, la ligne ponctuée représente la forme qu'aurait prise la corde rendant le son fondamental seul.

C'est, croyons-nous, à Riccati (1) qu'il faut rapporter les premières considérations sur la forme que prend une corde ainsi soumise à deux modes vibratoires simultanés.

(1) *Loc. cit.* $\dots + (x) \cdot \varphi + (x) \cdot \varphi = (x) \cdot \varphi$
 $\dots + (x) \cdot \varphi + (x) \cdot \varphi = (x) \cdot \varphi$

Notes D

A. PARENT, imprimeur de la Faculté de Médecine, rue Mr-le-Prince, 31.