

thode indirecte, fondée sur les lois des vibrations des tuyaux sonores ou des verges élastiques.

640. **Propagation du son dans un tuyau cylindrique indéfini.** — **Longueur d'onde.** — Nous pouvons maintenant concevoir, d'une manière plus précise, comment s'effectue la propagation du son dans un milieu comme l'air. — Nous considérerons d'abord, pour simplifier, le cas d'un tuyau cylindrique indéfini AB (fig. 533), à l'intérieur

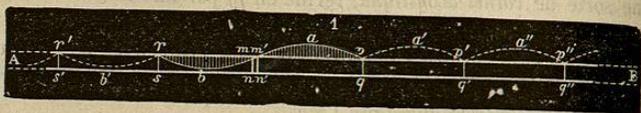


Fig. 533.

duquel une lame solide exécuterait une série de vibrations entre deux positions extrêmes mn et $m'n'$.

Considérons d'abord ce qui se passerait dans le tuyau, si la lame n'exécutait qu'une *demi-vibration*, de mn en $m'n'$. Pendant la durée de cette demi-vibration, la lame acquiert des vitesses qui vont d'abord en croissant, puis en décroissant (669). Chacune des impulsions qu'elle imprime, pendant ce mouvement, à la couche d'air qui est en contact immédiat avec elle, se transmet progressivement de cette couche aux couches situées à droite. Il en résulte que, à l'instant où la lame solide atteint la position $m'n'$, l'impulsion *initiale* est parvenue à une certaine tranche d'air pq ; l'impulsion *finale* n'est encore parvenue qu'à la tranche d'air qui touche immédiatement $m'n'$; les impulsions correspondantes aux positions intermédiaires de la lame solide se trouvent dans les tranches d'air situées entre $m'n'$ et pq . A cet instant, la *vitesse d'ébranlement* est d'ailleurs très différente pour chacune de ces tranches: elle est sensiblement nulle pour les tranches $m'n'$ et pq ; elle est maximum pour la tranche située au milieu de cet intervalle. — On doit remarquer enfin que ces ébranlements ont pour effet de faire éprouver des *compressions* aux tranches d'air successives, dans tout l'intervalle compris entre $m'n'$ et pq . A l'instant que nous considérons, la compression est variable d'une tranche à l'autre: elle est sensiblement nulle en $m'n'$ et en pq : elle est maximum au milieu de cet intervalle. Si l'on convient de représenter la valeur de la compression, en chaque point, par une perpendiculaire élevée sur l'arête du cylindre, la courbe qui joindra les extrémités de ces perpendiculaires présentera une forme telle que $m'ap$. — La colonne d'air $m'n'pq$, à laquelle s'est communiqué le mouvement de la lame solide, pendant que cette lame a effectué cette demi-vibration, s'appelle une *demi-onde condensée*. La distance $m'p$ s'appelle la *demi-longueur d'onde*.

Si le mouvement de la lame solide s'arrêtait là, il y aurait ensuite

simplement transmission, dans les tranches d'air suivantes, des ébranlements que nous venons de considérer; c'est-à-dire que, au bout d'un intervalle de temps égal au premier, la demi-onde condensée occuperait la position pp' ; puis, au bout d'un nouvel intervalle de temps égal, la position $p'p''$, et ainsi de suite (*).

Des considérations semblables montrent que, pendant ce même mouvement de la lame solide de mn en $m'n'$, il se produit, à gauche, une *demi-onde dilatée* $m'n'rs$ (fig. 533). A la fin de la demi-vibration, chacune des tranches d'air de cette demi-onde possède une vitesse d'ébranlement dirigée de gauche à droite, en même temps qu'elle éprouve une *dilatation*: si l'on représente ces dilatations par des perpendiculaires menées au-dessous de l'arête du cylindre, on obtient une courbe telle que $m'br$, qui représente l'état de l'air, à cet instant, dans cette partie du tuyau. — Si le mouvement de la lame solide s'arrêtait là, cette demi-onde dilatée se propagerait simplement de droite à gauche, de manière à occuper les positions $rr', r'r'', \dots$ au bout d'intervalles de temps successifs égaux chacun à la durée de la demi-vibration.

Considérons maintenant ce qui se passe quand le mouvement vibratoire de la lame solide se continue. — Au moment où la lame solide revient en mn , la demi-onde condensée qui avait pris naissance à droite est parvenue en $pp'q'$ (fig. 534); de plus, en $m'n'pq$, il s'est formé une

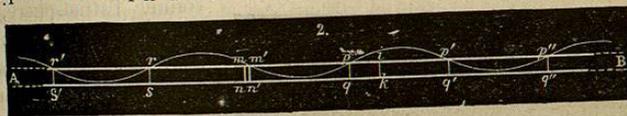


Fig. 534.

demi-onde dilatée. De même, la demi-onde dilatée qui avait pris naissance à gauche est parvenue en $rsr's'$; en $m'n'rs$, il s'est formé une demi-onde condensée. — En d'autres termes, après une *vibration complète* de la lame solide, on trouve, à droite de la lame, une onde entière $mnp'q'$; à gauche, une onde entière $mnr's'$; chacune d'elles se compose d'une demi-onde condensée et d'une demi-onde dilatée, mais ces deux demi-ondes se succèdent en ordre inverse à partir de mn . — On appelle *longueur d'onde* la distance, mp' ou $m'r'$, à laquelle le mouvement s'est transmis pendant que la lame solide a effectué une vibration complète.

Il en sera de même après un nombre entier quelconque de vibrations: on aura alors, à droite de mn , une série de demi-ondes alternativement dilatées et condensées; à gauche de mn , une série de demi-ondes alternativement condensées et dilatées: c'est ce qu'indique la figure 534.

(*) Il est essentiel de remarquer que ce sont les vitesses d'ébranlement et les compressions qui se déplacent, dans la longueur du tuyau, et non les tranches d'air. Chaque tranche ne se déplace que d'une quantité très petite, pour transmettre à la tranche suivante la compression qu'elle a reçue de la tranche qui la précède.

D'après l'ensemble de ces résultats, il est facile de se rendre compte des phénomènes qui se produisent, à des instants successifs, dans une tranche d'air déterminée, prise en un point quelconque du tuyau, en *ik* par exemple. — La figure 554 représente cette tranche à un moment où elle se trouve dans une demi-onde condensée; elle possède une vitesse d'ébranlement dirigée de gauche à droite. Pendant tout le temps que cette demi-onde emploie pour traverser *ik*, c'est-à-dire pendant la durée d'une demi-vibration de la lame solide, cette tranche acquiert des vitesses d'ébranlement d'abord croissantes, puis décroissantes, mais toujours dirigées de gauche à droite. Une demi-onde dilatée arrive ensuite en *ik* : elle emploie encore le même temps pour traverser cette tranche, qui acquiert alors des vitesses d'ébranlement d'abord croissantes, puis décroissantes, mais dirigées de droite à gauche; et ainsi de suite. — Donc, en définitive, une tranche d'air quelconque, prise dans le tuyau, vibre comme la lame solide elle-même, entre deux positions extrêmes, peu distantes l'une de l'autre. La durée de la vibration de cette tranche est égale à la durée de la vibration de la lame solide.

641. Propagation du son dans un milieu indéfini en tous sens. — Diminution progressive d'intensité. — Lorsque le mouvement vibratoire se produit dans un milieu indéfini en tous sens

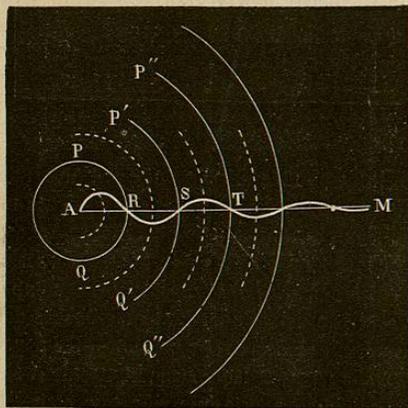


Fig. 555. — Propagation d'un mouvement vibratoire dans un espace indéfini en tous sens.

comme l'atmosphère, la transmission du mouvement s'effectue dans toutes les directions, d'une manière semblable à celle qui vient d'être indiquée pour un tuyau cylindrique. — Dès lors, si A est le point d'où émanent les vibrations (fig. 555), le mouvement se communique, pendant la durée d'une vibration complète, à tous les points compris dans une sphère PQ ayant pour centre le point A et pour rayon la longueur d'onde. Puis, pendant la durée de la vibration suivante, cette même sphère reçoit les mouvements correspondants à cette seconde vibration, en même temps que les mouvements correspondants à la première vibration se propagent dans l'espace compris entre la surface PQ et la surface P'Q' d'une sphère de rayon double; et

ainsi de suite. — Or les volumes d'air compris entre les surfaces sphériques consécutives PQ, P'Q', P''Q'',.... vont en augmentant : il en résulte que les amplitudes des mouvements vibratoires acquis par les couches d'air successives vont en diminuant : par suite, l'intensité du son va en décroissant, à mesure qu'on s'éloigne du point A où il se produit. Si l'on considère une droite indéfinie quelconque AM, partant du point A, la courbe ARST...., qui représente soit les vitesses d'ébranlement, soit les condensations ou dilations aux différents points de cette droite, à un instant déterminé, va en se rapprochant de plus en plus de la droite AM, à mesure qu'elle s'éloigne du point de départ. — L'observation montre en effet que, dans l'atmosphère, l'intensité du son perçu est d'autant plus faible que l'oreille est placée plus loin du corps sonore.

642. Propagation du son dans un tuyau indéfini. — Conservation de l'intensité. — Dans un tuyau cylindrique, l'onde conservant un volume constant, l'amplitude du mouvement vibratoire conserve une même valeur pour toutes les tranches successives; par suite, le son conserve une intensité sensiblement constante à toute distance. La seule cause de diminution d'intensité consiste dans les frottements que l'air éprouve, dans ses mouvements, contre les parois du tuyau.

Tout le monde connaît, par exemple, l'usage des tubes acoustiques (fig. 556) qui permettent de transmettre la voix à d'assez grandes dis-

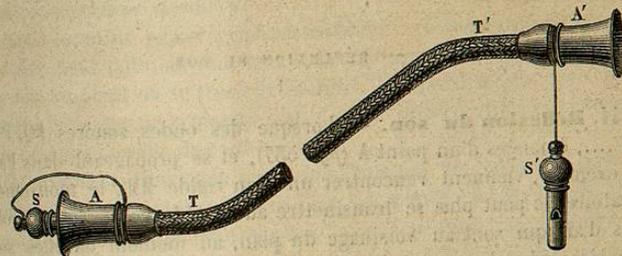


Fig. 556. — Tube acoustique.

tances, au travers des murs ou des planchers. Ce sont des tubes de caoutchouc TT', terminés à chacune de leurs extrémités par une embouchure en forme d'entonnoir, A, A'. Dans chacune des embouchures, on engage un sifflet S, destiné à jouer le rôle d'avertisseur. — Lorsqu'une personne placée à l'extrémité A' veut entrer en conversation avec une autre personne placée à l'extrémité A, elle enlève le sifflet S', et souffle fortement dans le tube, de manière à faire résonner le sifflet S. Cet appel ayant été entendu, la conversation peut s'engager presque à voix basse : celui qui parle place sa bouche à une petite distance

de l'embouchure, tandis que celui qui écoute applique son oreille contre l'embouchure de l'autre extrémité.

645. Relation entre la vitesse du son et la longueur de l'onde.

— Lorsqu'un son est produit à l'ouverture d'un tuyau cylindrique contenant de l'air, la première vibration détermine la formation d'une onde, qui se propage dans le tuyau avec la vitesse de propagation du son dans l'air, environ 340 mètres par seconde; au bout d'une seconde, l'extrémité antérieure de cette onde se trouve donc à 340 mètres environ du corps sonore. Or, si l'on suppose, par exemple, que, pendant une seconde, le corps vibrant ait exécuté 60 vibrations, cet espace de 340 mètres pourra se décomposer en 60 parties égales, dont chacune correspondra à la longueur d'une onde sonore. — D'après ce qui a été dit plus haut (641), le même raisonnement s'applique au cas où le son se propage dans un milieu indéfini.

En général, soit v la vitesse de propagation du son dans un milieu quelconque; soit n le nombre de vibrations exécutées par un corps sonore pendant une seconde, et λ la longueur particulière de l'onde correspondante à ce nombre de vibrations : on aura

$$v = n\lambda.$$

Cette relation permet de calculer l'une des trois quantités v , n , λ , lorsqu'on connaît les deux autres.

IV. — RÉFLEXION DU SON.

644. Réflexion du son. — Lorsque des ondes sonores PQ, P'Q, P''Q'...., émanées d'un point A (fig. 537), et se propageant dans l'air, par exemple, viennent rencontrer un plan rigide MM', le mouvement vibratoire ne peut plus se transmettre au delà de ce plan : les molécules d'air qui sont au voisinage du plan, au moment où elles sont ébranlées, rebondissent sur la surface du plan, en sorte que les vitesses d'ébranlement changent de signe. Il se produit ainsi une série d'ondes réfléchies RS, R'S',...., se propageant en sens inverse des ondes directes, comme si elles émanaient d'un point A', symétrique de A par rapport au plan MM', c'est-à-dire situé sur la perpendiculaire AB, et à une distance BA' égale à BA.

Ce phénomène, qui constitue la *réflexion du son*, est absolument analogue au phénomène de la *réflexion de la lumière*, que nous étudierons plus loin. — Un point lumineux A étant placé en face d'un miroir plan, nous verrons que la *lumière* se comporte, après réflexion, comme si elle émanait d'un point A', symétrique du point A par rapport au miroir, et qu'on appelle l'*image* du point A. — Par analogie, dans la réflexion

des ondes sonores que nous venons d'indiquer (fig. 537), le point A pourrait être appelé l'*image sonore* du point A.

L'identité des lois de la réflexion du son avec les lois de la réflexion de la lumière peut se démontrer par l'expérience suivante. — On place, devant un miroir sphérique concave, la lumière d'une bougie, en un point qu'on appelle le *foyer principal* du miroir : les rayons émis par la bougie sont réfléchis par le miroir dans une direction parallèle à son axe. On reçoit ces rayons sur un autre miroir sphérique, disposé à une distance de plusieurs mètres, et ayant son axe dans la même direction que le premier; ce second miroir réfléchit à son tour les rayons lumineux, et les concentre en son foyer, de manière à éclairer vivement

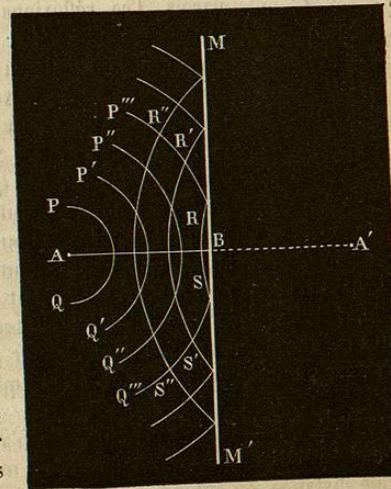


Fig. 537. — Réflexion des ondes sonores.

un petit écran de papier placé en ce point. — Cette expérience préliminaire étant faite, on remplace la bougie par une montre, et l'on met l'oreille au point où se trouvait l'écran : l'oreille perçoit alors distinctement le tic-tac de la montre, qui devient imperceptible pour peu que l'on dérange l'oreille de cette position.

Un phénomène analogue se produit dans une des salles du Conservatoire des arts et métiers, à Paris. Deux personnes, placées à deux angles opposés de la salle, et tournées vers le mur, peuvent causer entre elles à voix basse, sans que leur conversation soit entendue des personnes

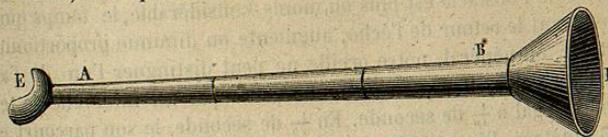


Fig. 538. — Porte-voix.

qui se trouvent dans l'intervalle; ce phénomène est dû à la réflexion du son sur les parois de la voûte.

Le *porte-voix* (fig. 538), dont on se sert pour transmettre la voix dans

une direction déterminée et à une assez grande distance, est un tube de forme conique AB, au sommet duquel est une embouchure E, assez large pour qu'on puisse y introduire la bouche sans que les mouvements des lèvres soient gênés par les parois. Les réflexions qu'éprouvent les vibrations sonores, à l'intérieur du tube, les amènent à se propager, au sortir du pavillon P, dans une direction parallèle à son axe : la voix peut ainsi porter à une distance beaucoup plus grande que si elle était émise à l'air libre.



Fig. 539. — Cornet acoustique.

Le *cornet acoustique* (fig. 539), dont se servent les personnes qui ont l'ouïe dure, est un tube conique, de dimensions beaucoup plus petites, et recourbé à ses extrémités. Le sommet S du cône étant introduit dans l'oreille, et le pavillon P étant tourné vers le point où se produisent les sons que l'on veut entendre, l'instrument recueille toutes les vibrations qui viennent frapper sa partie élargie, et les fait converger dans la petite tranche d'air qui est au voisinage de l'oreille.

645. Échos. — Il n'est personne qui n'ait entendu le phénomène de l'écho. Un cri étant poussé en face d'un mur élevé, situé à une assez grande distance, on entend ce cri répété, au bout d'un temps plus ou moins long, selon la distance à laquelle se trouve le mur. — Une montagne, ou même une colline, peut donner lieu au même phénomène. — Dans ces divers cas, les vibrations sonores, en rencontrant l'obstacle que leur oppose le mur ou la montagne, sont renvoyées par cet obstacle, et reviennent à l'oreille.

Pour nous rendre compte des conditions dans lesquelles l'écho peut s'entendre distinctement, supposons, par exemple, que l'obstacle soit placé à une distance de 170 mètres; le son doit alors parcourir, dans l'aller et le retour, une distance de 2 fois 170 mètres, ou 340 mètres: c'est précisément l'espace que le son parcourt en une seconde. Donc, dans ce cas, c'est au bout d'une seconde que l'on entend l'écho. — Selon que la distance de l'obstacle est plus ou moins considérable, le temps qui s'écoule, avant le retour de l'écho, augmente ou diminue proportionnellement. Or, en général, notre oreille ne peut distinguer l'un de l'autre deux sons successifs, que s'ils sont séparés par un intervalle de temps au moins égal à $\frac{1}{10}$ de seconde. En $\frac{1}{10}$ de seconde, le son parcourt environ 34 mètres. Dès lors, le son direct ne pourra se distinguer du son dû à la réflexion, que si la distance de l'obstacle est plus grande que la moitié de 34 mètres, ou 17 mètres.

Dans certaines circonstances, il arrive que des obstacles multiples se trouvent disposés de façon à renvoyer un même son plusieurs fois à l'oreille, après plusieurs réflexions successives. Les échos qui se succè-

dent présentent alors une intensité décroissante, à cause de l'accroissement des distances parcourues par le son (*).

646. Résonance. — Quand on parle dans un appartement dont les murs sont éloignés seulement de quelques mètres, les sons renvoyés par les murs succèdent presque immédiatement aux sons directs: ils nous paraissent alors se produire en même temps, et ne font que donner à la parole plus d'intensité. C'est ce qui fait que l'on s'entend mieux dans un endroit fermé qu'en plein air.

Il n'en est plus de même dans une salle un peu vaste: chacun des sons produits semble alors se continuer avec les échos qui lui succèdent, et peut même arriver à se confondre avec les sons suivants. — Cet effet, que l'on désigne sous le nom de *résonance*, est tellement manifeste dans certaines salles, que la parole y devient difficilement intelligible; les syllabes successives se confondent les unes avec les autres, en une sorte de bourdonnement.

On parvient à faire disparaître cet inconvénient, au moins en partie, en disposant, le long des murs, des draperies qui amortissent les vibrations et rendent la salle moins sonore. — Dans nos salles de théâtre, les résonances sont amoindries par tous les détails d'architecture qui interrompent la régularité des murs: par les galeries, les colonnades, les balcons en saillie, etc.

(*) On rencontre assez fréquemment des échos de ce genre dans les pays de montagnes. — On cite, comme l'un des plus remarquables, celui de la villa Simonetta, près de Milan. Un coup de pistolet, tiré d'une fenêtre de la villa, est répété une quarantaine de fois.