

412. Vitesse du son dans les liquides et dans les solides. — En 1827, Sturm et Colladon, par une méthode semblable à la précédente, mesurèrent la vitesse de propagation du son dans l'eau. — Les expériences furent faites sur le lac de Genève. Une cloche C (fig. 257),

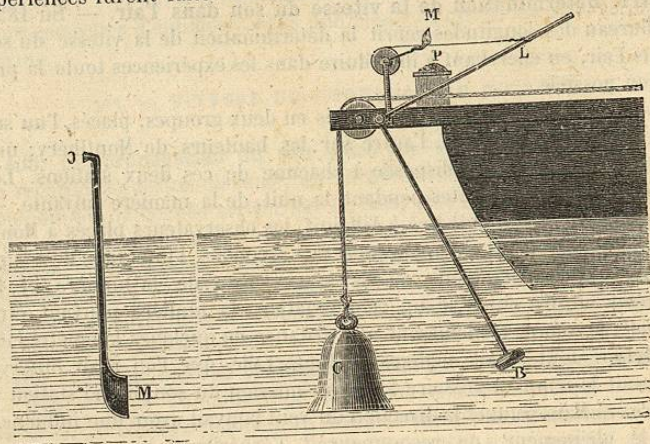


Fig. 257. — Détermination de la vitesse du son dans l'eau.

suspendue à un bateau B et plongée dans l'eau du lac, était frappée par un marteau *b* dont le manche sortait de l'eau; le mouvement du marteau entraînait une mèche qui, au moment où le choc avait lieu, mettait le feu à un tas de poudre *m*. Au rivage opposé, on notait l'instant où l'on apercevait la lumière, et l'instant où arrivait le son transmis par l'eau; ce son était perçu à l'aide d'un *cornet acoustique*, fermé en *fg* par une membrane; on appliquait l'oreille à l'extrémité supérieure *o*. — On trouva, pour la vitesse du son dans l'eau, à la température de 8°, le nombre 1455 mètres par seconde: c'est une vitesse environ quatre fois égale à la vitesse du son dans l'air.

On doit à Biot la détermination expérimentale de la vitesse du son dans la fonte de fer. — Un timbre avait été fixé à l'extrémité d'une conduite formée par des tuyaux de fonte, dont la longueur était de 951<sup>m</sup>,25. Un des expérimentateurs frappait un coup sur le timbre, à un certain instant. Un autre expérimentateur appliquait son oreille à

formule dans laquelle  $\alpha$  représente le coefficient de dilatation de l'air. En remplaçant, dans les expériences du Bureau des longitudes,  $v$  par sa valeur 340,9,  $\alpha$  par 0,00567 et  $t$  par 16°, on trouve  $v_0 = 351,5$ . — Les expériences effectuées par Regnault, dans la plaine de Satory, ont fourni, pour la vitesse de propagation du son dans l'air, à la température zéro, la valeur moyenne 350,5. Inversement, connaissant la vitesse  $v_0$ , la formule de Newton permet de trouver la vitesse  $v$  à une température quelconque  $t$ .

l'autre extrémité de la conduite; il entendait distinctement, à 2 secondes et demie d'intervalle, deux sons successifs, le premier transmis par le métal, le second transmis par l'air intérieur. — En désignant respectivement par  $a$  et  $x$  les vitesses du son dans l'air et dans la fonte,  $\frac{951,25}{a}$  et  $\frac{951,25}{x}$  représentaient les durées de la transmission par l'air et par le métal; on avait donc

$$\frac{951,25}{a} - \frac{951,25}{x} = 2,5.$$

En résolvant cette équation, on trouve  $x = a \times 10,5$ ; c'est-à-dire que la vitesse dans la fonte est environ dix fois et demie égale à la vitesse dans l'air.

On verra plus loin comment on a pu déterminer les vitesses du son dans les divers gaz (459), et dans les liquides (440) par une méthode indirecte, fondée sur les lois des vibrations des tuyaux sonores.

413. Propagation du son dans un tuyau cylindrique indéfini. — Longueur d'onde. — Pour concevoir comment s'effectue la propagation du mouvement vibratoire, nous considérerons d'abord, pour simplifier, le cas d'un tuyau cylindrique (fig. 258), que nous supposerons indéfini

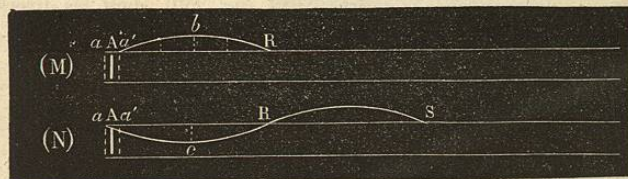


Fig. 258.

vers la droite, et à l'entrée duquel un son sera produit par une lame solide A exécutant une série de vibrations entre deux positions extrêmes  $a$  et  $a'$ , d'un mouvement semblable à celui de l'extrémité de la lame représentée par la figure 254. — Nous appellerons toujours *vibration*, la succession de deux oscillations en sens inverse, c'est-à-dire le mouvement *d'allée et de retour*.

Pendant la *première demi-vibration*, la lame solide, se mouvant de  $a$  en  $a'$ , avec une vitesse d'abord croissante puis décroissante, peut être considérée comme imprimant, à la tranche d'air voisine, une série d'ébranlements dont chacun se transmet aux tranches suivantes avec la vitesse de propagation du son. A l'instant où la lame arrive en  $a'$ , l'ébranlement *initial* est parvenu en R, par exemple (fig. 258, M); l'ébranlement *final* est encore en  $a'$ , en sorte que, à cet instant, la vitesse d'ébranlement est sensiblement nulle en  $a'$  et en R; elle est maximum au



milieu de cet intervalle. — Chacune de ces tranches d'air, par le fait même de l'ébranlement qui lui est imprimé, éprouve d'ailleurs une *compression* proportionnelle. Si l'on représente la valeur de la compression, dans chaque tranche, par une perpendiculaire élevée sur l'arête du tuyau, la courbe qui joindra les extrémités de ces perpendiculaires présentera une forme telle que  $a'bR$ . — La colonne d'air  $a'R$ , à laquelle s'est communiqué le mouvement de la lame solide pendant cette demi-vibration, s'appelle une *demi-onde condensée*. La distance  $a'R$  s'appelle la *demi-longueur d'onde* (\*).

Pendant la *seconde demi-vibration*, le mouvement de la lame solide ayant lieu vers la gauche, de  $a'$  en  $a$  (fig. 258, N), la tranche d'air qui est en contact avec elle, du côté du tuyau, reçoit une série d'ébranlements, vers la gauche, et chacun de ces ébranlements produit une *dilatation*. La propagation s'effectuant toujours avec la vitesse de propagation du son, la colonne d'air  $aR$  contient, au bout de cette seconde demi-vibration, une *demi-onde dilatée* qui peut être représentée par la branche de courbe  $acR$ , située au-dessous de la droite  $aR$ . En même temps, la demi-onde condensée s'est transportée en  $RS$ . — La distance  $aS$  est ce qu'on appelle la *longueur d'onde*.

On voit ainsi que, pendant le mouvement continu de la lame solide, on peut se représenter l'état de l'air dans le tuyau, *aux instants successifs*, en imaginant que la courbe  $ARST$  (fig. 259), dont les diverses

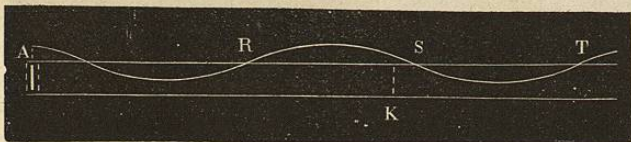


Fig. 259.

parties se reproduisent progressivement d'une manière toujours identique, se transporte d'un mouvement continu vers la droite, avec une vitesse égale à la vitesse de propagation du son. Or, considérons une tranche quelconque  $K$  du tuyau. La figure 259 représente la position de la courbe au moment où parvient en  $K$  une demi-onde condensée. Pendant le temps que cette demi-onde met à traverser la tranche  $K$ , 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, et toujours dirigées vers la droite. Une demi-onde dilatée arrive ensuite à la tranche  $K$  et lui communique, pendant le même

(\*) 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 pas 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.

temps, des vitesses d'ébranlement d'abord croissantes, puis décroissantes, mais dirigées vers la gauche; et ainsi de suite. — Donc, en définitive, une tranche d'air quelconque, prise dans le tuyau, vibre comme la lame solide, entre deux positions extrêmes, peu distantes l'une de l'autre. La durée d'une vibration de cette tranche est égale à la durée d'une vibration de la lame solide.

414. 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, comme l'atmosphère, la transmission du mouvement s'effectue dans toutes les directions, avec la même vitesse que dans un tuyau cylindrique. — Dès lors, si  $A$  est le point d'où émanent les vibrations (fig. 260), le mouvement se communique, pendant la durée de la première demi-vibration, à l'air compris dans une sphère  $PQ$  ayant pour centre  $A$  et pour rayon la demi-longueur d'onde. Puis, cette

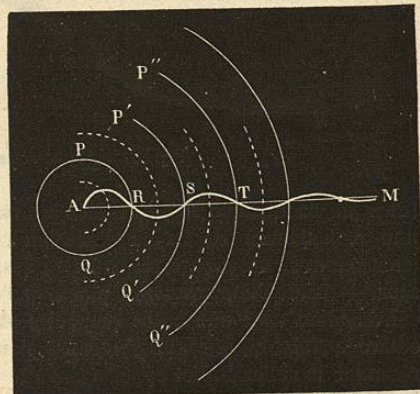


Fig. 260. — Propagation d'un mouvement vibratoire dans un espace indéfini en tous sens.

même sphère reçoit les mouvements correspondants à la seconde demi-vibration, en même temps que les mouvements correspondants à la première 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, c'est-à-dire que l'intensité du son va en décroissant, à mesure qu'on s'éloigne du point  $A$ . Dans une direction déterminée  $AM$ , la courbe  $ARST$ ..., qui représente, à un instant déterminé, l'état de l'air aux différents points de cette droite, va en se rapprochant de plus en plus de la droite elle-même.

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.

415. Propagation du son dans un tuyau indéfini. — Conservation de l'intensité. — Dans un tuyau cylindrique, les ondes successives conservant un volume constant, 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.

On connaît l'emploi que l'on fait des *tubes acoustiques* (fig. 261), pour transmettre la voix au travers des murs ou des planchers. Ce sont des

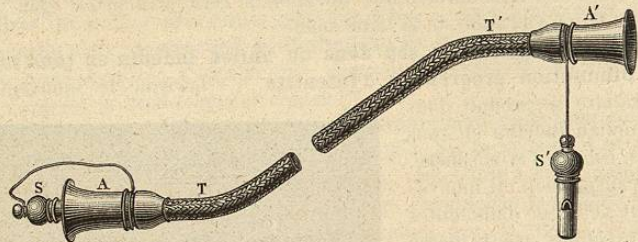


Fig. 261. — Tube acoustique.

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 proximité de 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 et les deux sifflets étant enlevés, la conversation peut s'engager presque à voix basse : celui qui parle place sa bouche contre l'embouchure, tandis que celui qui écoute applique son oreille à l'embouchure de l'autre extrémité.

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

— Si l'on imagine qu'un son soit produit à l'ouverture d'un tuyau indéfini, contenant de l'air, la vitesse de propagation du son dans l'air étant environ 340 mètres par seconde, l'extrémité antérieure de la première onde produite doit se trouver, au bout d'une seconde, à 340 mètres du point de départ. Si, pendant une seconde, le corps vibrant a exécuté 400 vibrations, cet espace de 340 mètres se décompose alors en 400 parties égales, dont chacune représente la *longueur d'onde*. — Le même raisonnement s'applique au cas où le son se propage dans un milieu indéfini en tous sens.

En général, soit  $v$  la vitesse de propagation du son dans un milieu quelconque; soient  $n$  le nombre de vibrations, par seconde, d'un son déterminé, et  $\lambda$  la longueur particulière de l'onde correspondante à ce son; on aura

$$\lambda = \frac{v}{n}.$$

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

#### IV. — RÉFLEXION DU SON

**417. Réflexion du son.** — Lorsque des ondes sonores PQ, P'Q', P''Q''..., émanées d'un point A (fig. 262), 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.

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 lumineux A. — De même, les ondes sonores réfléchies (fig. 262) se comportent comme si elles émanaient du point A', symétrique de A par rapport au plan MN : le point A' est ce qu'on peut appeler 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 : la lumière émise par la bougie est réfléchiée par le miroir, dans une direction parallèle à son axe. On la reçoit sur un autre miroir sphérique, disposé en face du premier, à une distance de plusieurs mètres : il la réfléchit à son tour, et la concentre en son foyer principal, de manière à éclairer vivement un petit écran placé en ce point. Si l'on remplace la bougie par une montre, et qu'on mette l'oreille au point où se trouvait l'écran, on perçoit distinctement le tic tac de la montre, qui devient imperceptible dans toute autre position (\*).

(\*) Un phénomène analogue se produit dans une des salles du Conservatoire des Arts

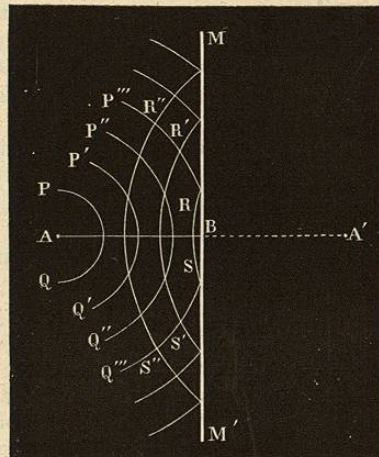


Fig. 262. — Réflexion des ondes sonores.



Le *porte-voix* (fig. 265), dont on se sert pour transmettre la voix dans une direction déterminée et à une assez grande distance, est un

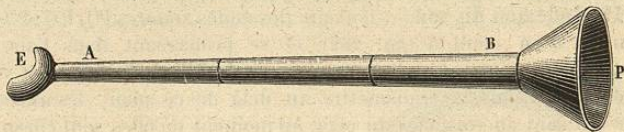


Fig. 265. — Porte-voix.

tube de forme conique AB, présentant une large embouchure E dans laquelle on émet la voix. 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. 264.  
Cornet  
acoustique.

Le *cornet acoustique* (fig. 264) 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 les vibrations qui viennent frapper sa partie élargie, et les fait converger vers l'oreille.

**418. Échos.** — Il n'est personne qui n'ait entendu le phénomène de l'écho. Un cri étant poussé à une certaine distance d'un obstacle, comme un mur ou une montagne, les vibrations renvoyées par cet obstacle reviennent à l'oreille, au bout d'un temps plus ou moins long.

Pour nous rendre compte des conditions dans lesquelles l'écho peut s'entendre distinctement, supposons, par exemple, que l'obstacle soit placé à 170 mètres ; le son doit alors parcourir, dans l'aller et 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* qu'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, notre oreille ne peut distinguer deux sons successifs, que s'ils sont séparés par un intervalle de temps au moins égal à  $\frac{1}{10}$  de seconde. Mais 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.

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

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

**419. Résonance.** — Quand on parle dans un appartement de dimensions restreintes, les échos renvoyés par les murs, pour chaque son, reviennent à l'oreille au bout d'un temps inappréciable. Pour chaque son, l'oreille ne distingue donc plus le son lui-même de l'écho qui lui succède, et la parole paraît simplement acquérir *plus d'intensité* qu'à l'air libre.

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 peut atténuer ces effets 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 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 de la villa, est répété une quarantaine de fois.