

le courant, produit une lumière d'un jaune doré. Si le vide a été bien fait dans le globe de verre, le charbon ne brûle pas, puisqu'il ne trouve pas d'oxygène dans l'espace qui l'entoure (*).



Fig. 510.
Lampe
Edison.



Fig. 511.
Lampe
Maxim.

On a imaginé un grand nombre de dispositions analogues à la précédente. — La figure 511 représente la *lampe Maxim*, dans laquelle le fil de charbon est plusieurs fois replié sur lui-même; il provient de la carbonisation d'une bande mince de carton bristol. Le globe a été rempli d'un gaz hydrocarboné, dans lequel la combustion ne peut s'effectuer. Une clef, placée à la base du globe, et présentant la forme du robinet d'un bec de gaz, permet d'établir ou d'interrompre le courant, de manière à allumer ou à éteindre la lampe.

Ces systèmes, et un grand nombre d'autres qui n'en diffèrent que par des détails, peuvent être disposés de manière à former des candélabres ou des lustres, et à satisfaire aux diverses exigences de l'éclairage, dans des locaux plus ou moins vastes. — Les courants destinés à alimenter ces foyers de lumière peuvent être produits, soit par des accumulateurs (558), soit par des machines de Gramme (651 et 652) ou par d'autres machines dynamo-électriques (**).

(*) L'expérience a montré cependant que la durée d'un même fil n'est pas indéfinie quand il a fonctionné, à divers intervalles, pendant 600 à 900 heures, il éprouve une désorganisation qui en détermine la rupture; il faut alors le renouveler.

(**) On construit deux types de lampe Edison, dont les intensités lumineuses sont respectivement 2 carcel et 1 carcel (liv. V, chap. 1). — Ces lampes exigent un courant de 0,65 ampère; pour la lampe de grand calibre, la différence des potentiels aux deux bornes, et la résistance du fil de charbon (quand la lampe est allumée) sont respectivement 90 volts et 140 ohms; pour le petit modèle, ces deux quantités sont réduites de moitié. — L'énergie dépensée par le courant pour produire 2 carcel, dans la lampe de grand calibre, est donnée par l'expression $W = i \times V \times 10^7$ ergs (576); elle est représentée par $58,5 \times 10^7$ ergs. — La dépense d'énergie, par carcel, est donc 29×10^7 ergs.

Il en résulte que l'éclairage par les lampes à incandescence est plus coûteux que l'éclairage par l'arc voltaïque. En effet, en se reportant aux notes des pages 564 et 568, on voit que la dépense d'énergie, par carcel et par seconde, est :

29×10^7 ergs,	pour les lampes Edison :
9×10^7 ergs,	pour les bougies Jablochkoff :
$7,5 \times 10^7$ ergs,	pour les lampes à régulateur.

Le prix de revient de l'éclairage électrique est donc d'autant plus élevé que la lumière est répartie en un plus grand nombre de foyers.

LIVRE QUATRIÈME

ACOUSTIQUE

CHAPITRE PREMIER

PRODUCTION ET PROPAGATION DU SON

I. — PRODUCTION DU SON.

661. **Production du son en général.** — Un son quelconque est toujours produit par un mouvement vibratoire, imprimé à un corps matériel.

Ainsi, quand un verre à boire est ébranlé par un choc, il produit un son : si l'on applique le doigt sur le bord du verre, on sent une sorte de frémissement, que l'on exprime en disant que le verre *vibre*. Dès que le contact du doigt fait cesser la vibration, on entend le son s'éteindre.

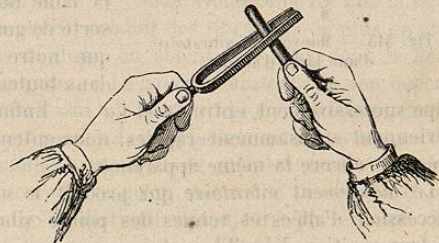


Fig. 512. — Diapason.

Prenons de même un *diapason* (fig. 512), et faisons-lui rendre un son, en écartant ses deux branches avec

une tige de bois et la faisant sortir vivement par l'extrémité de la fourche. Si nous appliquons le doigt sur l'une des branches, nous sentons le diapason vibrer : ici encore, le son s'éteint dès que la vibration cesse.

Les sons produits par les tuyaux d'orgue, résultent également d'un

mouvement vibratoire. Nous verrons que ce mouvement réside dans la masse d'air que contient le tuyau.

662. **Mouvement vibratoire.** — Pour nous faire une idée plus précise des mouvements qui produisent les sons, fixons dans un étau une lame d'acier AC (fig. 515), et laissons d'abord une assez

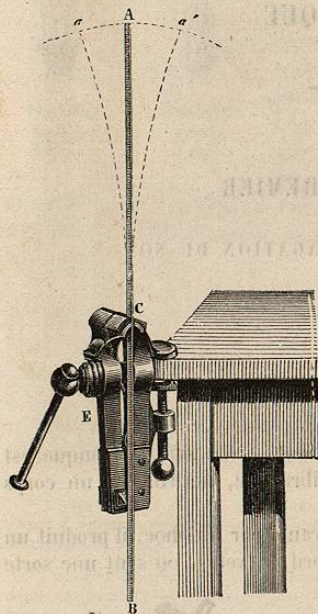


Fig. 515. — Mouvement vibratoire d'une lame d'acier.

grande longueur à la partie située au-dessus de l'étau. Si nous l'écartons avec le doigt, de manière à l'amener dans la position *Ca*, et si nous l'abandonnons, nous la voyons exécuter une série de mouvements, de part et d'autre de sa position d'équilibre; elle va de la position *Ca* à la position symétrique *Ca'*, revient en *Ca*, et ainsi de suite. La succession d'une allée et d'une venue de la lame est ce que nous appellerons *une vibration*. — Or, si nous répétons plusieurs fois l'expérience, en raccourcissant à chaque fois la partie vibrante, nous voyons les vibrations devenir *de plus en plus rapides*. Tant qu'elles étaient assez lentes, nous pouvions les suivre des yeux; quand elles sont plus rapides, nous cessons de distinguer les allées et venues; mais l'extrémité libre de la lame nous paraît éprouver une sorte de gonflement, qui est dû à ce

que notre œil l'aperçoit à la fois dans toutes les positions qu'elle occupe successivement entre *Ca* et *Ca'*. — Enfin, lorsque les vibrations deviennent suffisamment rapides, nous entendons un son, et la lame présente encore la même apparence.

Le *mouvement vibratoire* qui produit le son consiste donc en une succession d'allées et venues des points vibrants, de part et d'autre de leur position d'équilibre. Ce mouvement est trop rapide pour que notre œil puisse le suivre: il ne peut que le constater par des apparences comme celles que nous venons d'indiquer.

On peut faire des observations semblables sur une corde blanche, tendue au-dessus d'une planche noire entre deux chevalets A et B (fig. 514); on règle la tension de cette corde, au moyen d'une cheville sur laquelle elle s'enroule à l'une de ses extrémités. — Si la corde est peu tendue, et si on l'écarte avec le doigt, l'œil distingue les allées et

venues, de part et d'autre de la position d'équilibre. A mesure qu'on augmente la tension, les vibrations deviennent plus rapides; on n'observe bientôt plus qu'un gonflement apparent, sensible surtout vers le milieu de la corde. Enfin, on entend un son, lorsque les vibrations deviennent suffisamment rapides.

665. **Caractères distinctifs des sons. Intensité, hauteur, timbre.** — Nous étudierons plus loin, avec quelques détails, les caractères qui distinguent entre eux les divers sons. Mais nous pouvons dès maintenant, au moyen des expériences précédentes, préciser les conditions du mouvement qui correspondent à chacun de ces caractères.

Revenons à l'expérience de la lame vibrante (fig. 515), et après avoir donné à la lame une longueur assez petite pour qu'elle puisse rendre un son, laissons cette longueur invariable. Selon que nous écartons plus ou moins la lame, elle rend un son plus ou moins fort; mais il est facile de constater qu'elle donne toujours *la même note musicale*: elle la donne seulement avec plus ou moins d'intensité. — On peut donc dire que l'intensité du son dépend de l'amplitude des vibrations, c'est-à-dire de la grandeur des allées et venues de la lame, entre ses positions extrêmes *Ca* et *Ca'* (*).

De quoi dépend maintenant la *hauteur* du son, c'est-à-dire le caractère musical qu'on exprime en disant qu'une note est *plus haute* qu'une autre? — Nous avons constaté que la lame vibrante, lorsqu'on la raccourcit, produit des vibrations de plus en plus rapides. Or, en procédant ainsi, on obtient des sons dont la hauteur est de plus en plus grande. — La hauteur musicale du son dépend donc de la rapidité des vibrations: la hauteur est d'autant plus grande, qu'il se produit un plus grand nombre de vibrations en un même temps (**).

Enfin deux sons de même hauteur et de même intensité peuvent différer par un troisième caractère, qu'on nomme le *timbre*. C'est par la différence des timbres qu'on distinguera toujours, par exemple, les

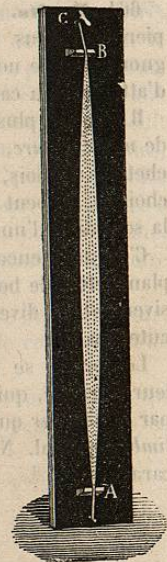


Fig. 514. — Vibration transversale d'une corde.

(*) On peut remarquer encore que, si on laisse les vibrations se continuer quelque temps, l'intensité du son diminue progressivement, à mesure que l'amplitude diminue elle-même. — Les mêmes observations peuvent être faites sur la corde vibrante (fig. 514).

(**) Il en est de même avec la corde vibrante. Nous savons déjà que, si l'on augmente la tension de la corde, on rend ses vibrations plus rapides. Or, en augmentant la tension, on obtient des sons de plus en plus élevés. Donc, ici encore, la hauteur du son dépend du nombre des vibrations qui se produisent en un temps déterminé.

sons d'une trompette de ceux d'un violon. Les causes des différences de timbres sont complexes ; nous y reviendrons plus loin (Chap. V).

664. **Bruits.** — Le choc d'un marteau sur une planche ou sur une pierre ne nous fait éprouver qu'une sensation vague, que nous désignons sous le nom de *bruit*, et à laquelle il paraît d'abord difficile d'attribuer un caractère de hauteur musicale.

Il n'en est plus de même, si nous comparons entre eux des bruits de même nature. — Ainsi, en laissant tomber sur le sol de petites planchettes de bois, dont les dimensions auront été convenablement choisies, on peut obtenir une série de bruits, donnant à l'oreille soit la sensation d'une gamme, soit celle d'un accord parfait.

C'est ainsi encore que l'on construit des *harmonicas* formés par des planchettes de bois, placées sur deux fils tendus ; en frappant successivement les diverses planchettes avec un petit marteau, on peut exécuter un air.

Les bruits se distinguent donc entre eux, comme les sons, par leur *intensité*, qui dépend de l'amplitude du mouvement vibratoire ; par la *hauteur* qui dépend de la rapidité des vibrations ; enfin par un *timbre* spécial. Nous reviendrons plus loin (719, 5^e) sur ce dernier caractère.

II. — PROPAGATION DU SON.

665. **Mode de propagation du son dans l'air. — Ondes sonores.** — Quand un corps sonore est mis en vibration dans l'atmosphère, les mouvements qu'il exécute se communiquent à l'air qui l'environne, et parviennent ainsi jusqu'à notre oreille.

Pour se rendre compte de la manière dont s'effectue cette transmission du mouvement vibratoire, il suffit d'observer ce qui se produit à la surface d'une eau tranquille, lorsqu'on y laisse tomber une pierre. Le choc de la pierre donne naissance à une petite vague, de forme circulaire, qui s'éloigne progressivement du point où elle s'est formée. — Si maintenant on produit, à la surface de l'eau, avec l'extrémité d'un bâton, une série de chocs se succédant à intervalles réguliers, la succession de ces mouvements produit une succession de vagues semblables, courant les unes à la suite des autres, autour du point où elles se forment. — Cependant, si l'on regarde avec attention un petit corps flottant à la surface de l'eau, comme un bouchon ou un brin de paille, on voit qu'il est soulevé chaque fois qu'il est rencontré par une vague, mais qu'il reste toujours sensiblement à la même place. Cette observation montre que les ébranlements communiqués à l'eau ont pour effet d'imprimer à chacun de ces points un mouvement de va-et-vient, semblable à celui du point d'où partent les ébranle-

ments eux-mêmes, mais qu'il n'y a pas transport de l'eau d'un bord vers l'autre.

Ce phénomène est l'image de ce qui se produit dans l'atmosphère, autour d'un corps sonore ; chacun des mouvements exécutés par le corps se communique successivement, et de proche en proche, à l'air qui l'environne. On donne, par analogie, le nom d'*ondes sonores*, aux couches d'air ébranlées à la suite les unes des autres, autour du point où se produisent les vibrations. — Dans la production de ces ondes, il n'y a pas transport de la masse d'air : chacun des points ébranlés exécute simplement de petits mouvements de *va-et-vient*, semblables à ceux qui constituent le mouvement vibratoire du corps sonore lui-même. — Enfin, notre oreille perçoit le son, par le mouvement vibratoire transmis à la couche d'air qui est en contact avec elle.

Nous reviendrons plus loin (673 et 674), avec un peu plus de détails, sur la production des ondes sonores, et sur le mode de constitution de chacune d'elles.

666. **Le son ne se propage pas dans le vide.** — Lorsqu'un corps est mis en vibration dans le vide, ses vibrations ne peuvent plus se transmettre à notre oreille. On le démontre en prenant un ballon de verre (fig. 545), dans lequel se trouve une clochette suspendue par un fil. Quand le ballon contient de l'air à la pression ordinaire, il suffit de l'agiter, pour entendre le son de la clochette : les vibrations sont transmises, par l'air du ballon, à la paroi de verre ; puis, par la paroi de verre, à l'air environnant, et enfin à notre oreille. — Si l'on fait le vide dans le ballon, on n'entend plus le son de la clochette. — Si l'on ouvre progressivement le robinet du ballon, de manière à y laisser rentrer lentement l'air, on constate que le son, d'abord très faible, reprend son intensité primitive lorsque la pression de l'air dans le ballon a repris sa première valeur.

Cette dernière remarque montre que l'air, lorsqu'il est raréfié, transmet le son avec moins d'intensité que lorsqu'il est à la pression ordinaire. — Au sommet des hautes montagnes, où la pression de l'air est bien moindre que dans la plaine, le son de la voix est affaibli. Les mêmes observations ont été faites dans les ascensions en ballon, à de grandes hauteurs dans l'atmosphère.

667. **Propagation du son par les liquides et par les solides.** — Les *liquides* peuvent transmettre les vibrations sonores. Un ouvrier placé au fond de l'eau, dans une cloche à plongeur, entend les bruits

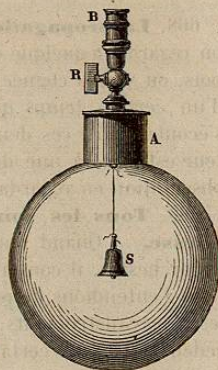


Fig. 545.

Le son ne se propage pas dans le vide.

qui se produisent sur le rivage. L'observation montre aussi que les poissons entendent les bruits qui se produisent autour d'eux.

Les corps *solides* transmettent aussi les sons : ils les transmettent même, en général, beaucoup mieux que l'air. — En appliquant l'oreille à l'extrémité d'une longue poutre, on entend distinctement les choes produits, à l'autre extrémité, par une pointe d'épingle, ou le tic-tac d'une montre placée contre la poutre. — En appliquant l'oreille sur le sol, on entend, à plusieurs kilomètres de distance, le roulement d'une voiture. — On peut entendre ainsi une décharge d'artillerie, à des distances où l'air n'en apporte plus aucun bruit perceptible (*).

Cependant les corps mous, comme les draperies, l'étoffe, le coton cardé, transmettent si imparfaitement les mouvements vibratoires, qu'on peut les employer pour amortir les sons. — C'est ce qui explique l'usage que l'on fait des portières en étoffe ou des portes rembourrées, pour empêcher d'entendre, dans une pièce, ce qui se dit dans la pièce voisine.

III. — VITESSE DE PROPAGATION DU SON.

668. **La propagation du son n'est pas instantanée.** — Quand on regarde, à quelque distance, un bûcheron frappant sur une pièce de bois, on voit la cognée arriver sur le bois, et c'est seulement au bout d'un certain temps qu'on entend le bruit du coup. L'intervalle qui s'écoule, entre ces deux instants, est d'autant plus long que l'observateur est placé à une distance plus grande. — On peut faire la même observation en regardant des chasseurs tirer dans la plaine.

669. **Tous les sons se propagent dans l'air avec la même vitesse.** — Quand nous entendons, de loin, un morceau exécuté par un orchestre, il conserve pour notre oreille le même caractère que si nous l'entendions de près. Les notes qui sont produites ensemble, par les divers instruments, nous arrivent ensemble : les notes qui se succèdent, dans un certain ordre et suivant une certaine mesure, nous arrivent dans le même ordre et avec la même mesure. — Ces observations montrent que tous les sons, quelle que soit leur hauteur, leur intensité ou leur timbre, se propagent dans l'air avec la même vitesse.

Dès lors, pour étudier la propagation du son, on peut employer un son quelconque. — On a choisi, comme nous allons le voir, un son qui

(*) Voici encore une expérience que chacun peut répéter. On place entre ses dents la queue d'une montre, et on applique les mains sur ses deux oreilles, de manière à les boucher hermétiquement. On entend le tic-tac de la montre, transmis par les dents et par les os de la tête. — On peut faire entendre des paroles à certains sourds, en employant une feuille de carton dont ils serrent le bord entre les dents, et en émettant fortement la voix contre cette feuille.

pût être entendu à une très grande distance, afin que le temps écoulé, entre le moment de sa production et le moment de son arrivée, fût assez long pour être facilement mesurable.

670. **Le mouvement de propagation du son est un mouvement uniforme.** — Dès l'année 1738, des expériences avaient été entreprises, par une Commission de l'Académie des sciences, pour mesurer la vitesse du son dans l'air. Une pièce de canon ayant été placée sur un lieu élevé, des observateurs situés à diverses distances déterminaient les intervalles de temps qui s'écoulaient, entre l'instant où ils apercevaient la lueur du coup de canon et celui où le son leur parvenait. — Dans ces expériences, on avait négligé quelques causes d'erreurs, dont on reconnut plus tard l'influence. Mais elles servirent au moins à constater que le son met un temps double, triple, quadruple, pour parcourir une distance double, triple, quadruple, c'est-à-dire que le mouvement de propagation du son est un *mouvement uniforme*.

Nous appellerons *vitesse du son*, l'espace (exprimé en mètres) que parcourt le son en une seconde.

671. **Détermination de la vitesse du son dans l'air.** — En 1822, le Bureau des longitudes reprit la détermination de la vitesse du son dans l'air, en cherchant à introduire dans les expériences toute la précision possible.

Les observateurs s'étaient partagés en deux groupes, placés, l'un sur les hauteurs de Villejuif, l'autre sur les hauteurs de Montlhéry; une pièce de canon était disposée à chacune de ces deux stations. Les observations furent faites pendant la nuit, de la manière suivante. — Un coup de canon étant tiré à Villejuif, les observateurs placés à Montlhéry déterminaient, avec une montre à secondes, l'intervalle de temps qui s'écoulait entre le moment où ils apercevaient de la lumière et le moment où ils entendaient la détonation : la lumière pouvant être considérée comme franchissant une distance de quelques kilomètres en un temps tout à fait négligeable, l'intervalle que l'on avait observé mesurait le temps nécessaire à la transmission du son, d'une station à l'autre. — Mais, comme la direction du vent pouvait avoir une influence sur la vitesse de transmission, on recommençait l'expérience en sens inverse, c'est-à-dire qu'on tirait ensuite un coup de canon à Montlhéry, et les observateurs placés à Villejuif effectuaient une détermination semblable. — On répéta plusieurs fois l'expérience, les deux stations alternant toujours entre elles; enfin, on prit la moyenne des résultats obtenus.

On trouva ainsi que le son mettait à peu près 55 secondes pour parcourir la distance d'environ 18 700 mètres. — Pour obtenir la valeur de la *vitesse du son*, c'est-à-dire l'espace parcouru en *une seconde*, il suffisait de diviser 18 700 mètres par 55, ce qui donne

540 mètres.

Cette vitesse, de 340 mètres par seconde, se rapporte aux conditions dans lesquelles se trouvait l'air au moment des expériences. La température était d'environ 15°, et la pression était voisine de la pression normale : ce sont donc les conditions les plus ordinaires. — Des expériences plus récentes de Regnault, effectuées dans des conditions très variées, ont montré que la vitesse du son augmente ou diminue, dans le même sens que la température, d'environ 0^m,6 pour un degré. — Il en résulte que, à la température de 0°, la vitesse du son est

$$340^m - 0^m,6 \times 15, \text{ c'est-dire } 331 \text{ mètres } (*).$$

672. **Vitesse du son dans les liquides et dans les solides.** — En 1827, Sturm et Colladon, par une méthode semblable à la précé-

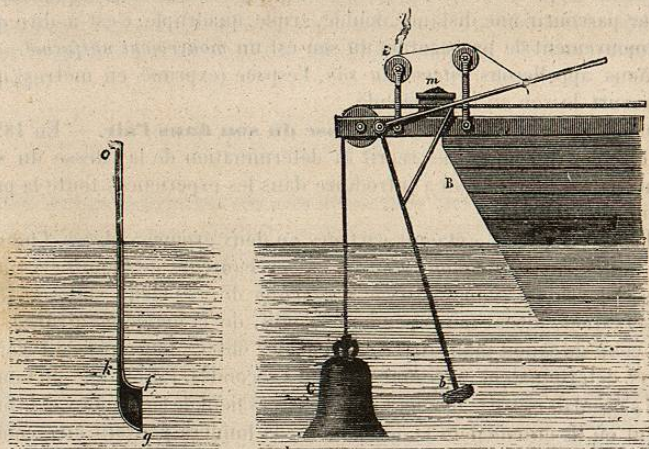


Fig. 516. — Détermination de la vitesse du son dans l'eau.

dente, mesurèrent la vitesse de propagation du son dans l'eau. — Des expériences furent faites sur le lac de Genève. Une cloche C (fig. 516),

(*) Pour déduire de la vitesse v , observée à la température t , la vitesse v_0 à la température zéro, on peut employer la formule suivante, qui a été donnée par Newton

$$v_0 = \frac{v}{\sqrt{1 + \alpha t}}$$

formule dans laquelle α représente le coefficient [de dilatation de l'air. En remplaçant, dans les expériences du Bureau des longitudes, v par sa valeur 340^m,9, α par 0,00567 et t par 16°, on trouve $v_0 = 331^m,3$. — 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 330^m,5.

Inversement, connaissant la vitesse v_0 , la formule de Newton permet de trouver la vitesse v à une température quelconque t .

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; au moment même où le choc avait lieu, le mouvement du marteau produisait l'inflammation d'une certaine quantité de poudre, placée en 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'une sorte de *cornet acoustique*, fermé en fg par une membrane, et à l'extrémité supérieure o duquel on appliquait l'oreille. — On trouva, pour la vitesse de propagation du son dans l'eau, à la température de 8°, le nombre 1435 mètres par seconde; c'est une vitesse environ quatre fois plus grande que 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^m,25. Un des expérimentateurs frappait un coup sur le timbre, à un certain instant. Un autre expérimentateur appliquait son oreille à 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 le son se propage dix fois et demie aussi vite dans la fonte que dans l'air.

On verra plus loin comment on a pu déterminer les vitesses du son dans les divers gaz (701), dans les liquides (702) et dans les corps solides (712), par une méthode indirecte, fondée sur les lois des vibrations des tuyaux sonores ou des verges élastiques.

675. **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 mouvement vibratoire dans un milieu comme l'air. — Nous considérerons d'abord, pour simplifier, le cas où la propagation a lieu, non pas dans un espace indéfini en tous sens, mais dans un tuyau cylindrique (fig. 517), que nous supposerons indéfini vers la droite, et à l'entrée duquel une lame solide A exécutera une série de vibrations entre deux

(*) Ces tuyaux venaient d'être établis pour amener à Paris les eaux de la source d'Arcueil.