

au point de vue des applications à l'éclairage, l'avantage de supprimer l'ombre portée par l'appareil : la plus grande partie de la lumière est dirigée vers le bas, au lieu de se perdre vers le ciel.

627. Éclairage par un fil conducteur porté à l'incandescence. — Système Edison. — L'Exposition d'électricité, qui a eu lieu en 1881, a fait connaître en France un mode d'éclairage électrique tout différent, qui permet de multiplier beaucoup les foyers de lumière en donnant à chacun d'eux moins d'intensité. On évite, par cette répartition, les inconvénients que présente parfois l'éclat éblouissant des systèmes d'éclairage précédents.

Dans la disposition imaginée par M. Edison, de New-York, le courant passe dans un fil de charbon C (fig. 527), de la grosseur d'un crin de cheval, placé dans un petit globe de verre A dans lequel on a fait un vide parfait. Ce fil a été obtenu par la carbonisation d'un filament découpé dans une tige de bambou : il est recourbé comme l'indique la figure, et fixé par ses extrémités à deux fils de platine, isolés l'un de l'autre, qui servent de conducteurs. — Le fil de charbon, porté à une vive incandescence par le courant, produit une lumière d'un jaune doré, dont l'éclat est comparable à celui d'une lampe Carcel. Si le vide a été bien fait dans le globe de verre, le char-



Fig. 527.
Lampe
Edison,



Fig. 528.
Lampe
Maxim.

bon ne brûle pas, puisqu'il ne trouve pas d'oxygène dans l'espace qui l'entoure (*).

On a imaginé un grand nombre de dispositions analogues à la précédente. — La figure 528 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 les 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 (551), soit par des machines de Gramme (619 et 620) 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.

LIVRE QUATRIÈME

ACOUSTIQUE

CHAPITRE PREMIER

PRODUCTION ET PROPAGATION DU SON

I. — PRODUCTION DU SON.

628. 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, qu'on exprime en disant que le verre *vibre*. Dès que le contact du doigt fait cesser la vibration, on entend le son s'éteindre.

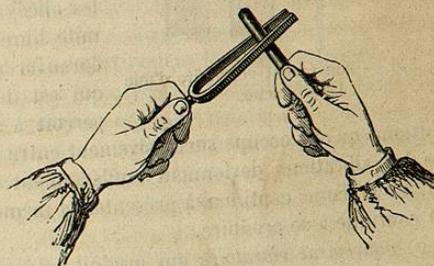


Fig. 529. — Diapason.

Prenons de même un diapason (fig. 529), 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.

Si on mettra que el diapason vira a colocandolo en un a superficie líquida, saltará el agua

Les sons produits par les instruments à vent, tels que les tuyaux d'orgue, la flûte, la trompette, résultent également d'un mouvement vibratoire. Nous verrons que ce mouvement réside dans la masse d'air que contient le tuyau.

629. **Mouvement vibratoire.** — Pour nous faire une idée des mouvements qui produisent les sons, fixons dans un étau une lame d'acier AC (fig. 530), et laissons d'abord une assez grande longueur à

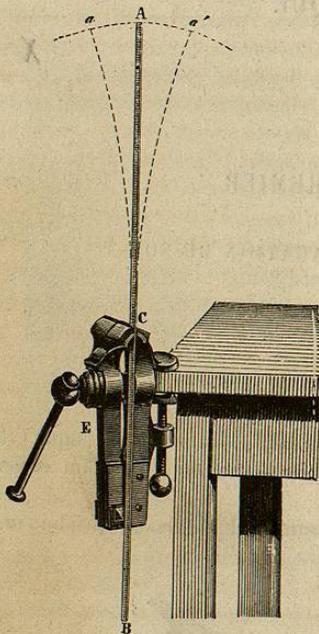


Fig. 530. — Mouvement vibratoire d'une lame d'acier.

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'appercçoit à la fois dans toutes les

positions qu'elle occupe successivement entre Ca et Ca'. — Enfin, lorsque les vibrations deviennent suffisamment rapides, on entend un son, et la lame continue à présenter la même apparence, tant que le son continue à se produire.

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 tendue entre deux chevalets, et dont on réglera la tension au moyen d'une cheville.

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.

630. **Caractères distinctifs des sons. Intensité, hauteur, timbre.** — Nous étudierons plus loin, avec quelques détails, les caractères qui distinguent entre eux les divers sons. — Mais les expériences précédentes suffisent déjà pour montrer quelles sont les conditions du mouvement qui correspondent à chacun de ces caractères.

Revenons à l'expérience de la lame vibrante (fig. 530), 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* ou *moins 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. — Donc la *hauteur musicale* du son dépend 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 sons d'une trompette de ceux d'un violon. Les causes des différences de timbres sont assez complexes, nous y reviendrons plus loin.

631. **Bruits.** — Lorsque nous entendons le choc d'un marteau sur une planche ou sur une pierre, nous ne percevons qu'une sensation vague et de courte durée, que nous désignons sous le nom de *bruit*. —

(*) 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 une corde vibrante.

(**) 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.

X Las dos posiciones a y a' se llaman de la misma manera, y se llaman de la misma manera a las posiciones de desequilibrio en el instrumento que da a cada sonido el instrumento

Cette sensation nous paraît d'abord toute différente de celle d'un son musical : nous serions assez embarrassés, par exemple, pour dire à quelle note musicale correspond tel ou tel de ces bruits.

Il n'en est plus de même, si nous comparons entre eux des bruits de même nature. — Prenons, par exemple, de petites planchettes de bois, dont les dimensions auront été convenablement choisies, et laissons-les tomber l'une après l'autre sur le sol : nous pourrions obtenir ainsi une série de bruits, donnant à notre 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. La succession de ces bruits produit sur l'oreille une impression moins agréable que celle des sons donnés par des harmonicas à lames de verre : mais les rapports musicaux des diverses notes sont tout aussi sensibles.

On peut donc dire que les bruits présentent, malgré la brièveté de leur durée, les caractères essentiels des sons eux-mêmes. Chacun d'eux possède une intensité particulière, qui dépend de l'amplitude du mouvement vibratoire; une hauteur, qui dépend de la rapidité des vibrations; enfin, un timbre particulier, variable avec la nature du corps qui produit le bruit.

II. — PROPAGATION DU SON.

632. 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, on peut se reporter à ce qu'on observe 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 s'est produit le choc. — 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 donne naissance à 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 commu-

niés à l'eau ont pour effet d'imprimer à chacun de ses points un mouvement de va-et-vient, semblable à celui du point d'où partent les ébranlements 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, 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 (640 et 641), avec un peu plus de détails, sur la production des ondes sonores, et sur le mode de constitution de chacune d'elles.

633. 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. 531), 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 moins bien le son que lorsqu'il est à la pression atmosphérique ordinaire. — Au sommet des hautes montagnes, où la pression de l'air est bien moindre que dans la plaine, le son de la voix perd beaucoup de son intensité; un coup de pistolet ne produit qu'un bruit comparable à celui d'un pétard. — Dans les ascensions en ballon, les aéronautes placés dans une même nacelle ont parfois de la peine à se faire

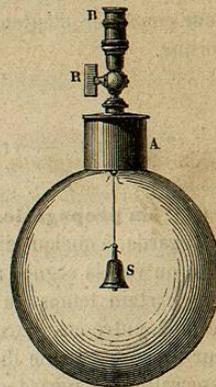


Fig. 531. — Le son ne se propage pas dans le vide.

entendre les uns des autres, quand il sont parvenus à des hauteurs où la pression de l'air est très faible.

654. 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 qui se produisent sur le rivage. — Les poissons entendent également les bruits qui se produisent autour d'eux : tous les pêcheurs à la ligne savent que, pour laisser arriver le poisson, il est nécessaire de garder un silence absolu.

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 chocs 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 des décharges d'artillerie, à des distances où l'air n'en apporte plus aucun bruit perceptible (*).

Cependant les corps mous, comme les draperies, l'étaupe, 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.

655. 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.

656. 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

(*) 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.

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 le mouvement de propagation du son, on peut employer un son quelconque. — On a choisi, comme nous allons le voir, un son qui 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.

657. Le mouvement de propagation du son est un mouvement uniforme. — Dès l'année 1758, 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 d'une distance donnée, 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.

658. Détermination de la vitesse du son dans l'air. — En 1822, les membres du Bureau des longitudes reprirent la détermination de la vitesse de 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 écoulé entre le moment où ils avaient aperçu 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 sem-

blable. — Pour plus de sûreté, 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, qui séparait les deux stations.

— Dès lors, pour obtenir la valeur de la *vitesse du son*, c'est-à-dire l'espace parcouru en *une seconde*, il ne restait qu'à diviser 18 700 mètres par 55, ce qui donne

340 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 1 degré. — Il en résulte que, à la température de 0°, la vitesse du son est

$340^m - 0^m,6 \times 15$, c'est-à-dire 351 mètres (*).

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

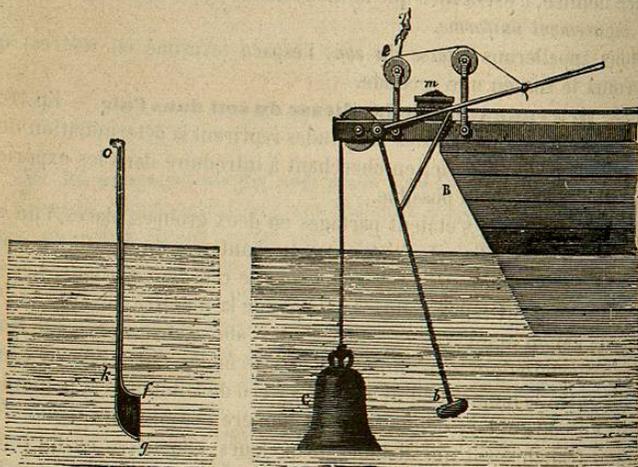


Fig. 552. — Détermination de la vitesse du son dans l'eau.

dente, mesurèrent la vitesse de propagation du son dans l'eau. — Les expériences furent faites sur le lac de Genève. Une cloche C (fig. 552),

(*) Pour déduire de la vitesse v , observée à la température t , la vitesse v_0 à la tem-

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 : la figure indique la disposition fort simple que les observateurs avaient imaginée à cet effet. 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 1455 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 (665) et dans les corps solides (676), par une mé-

thode, 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 $v_0 = 351^m,3$. — 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 350^m,5.

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

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