

correspondant, c'est-à-dire le nombre cherché, on a, d'après la loi des longueurs,

$$\frac{n}{870} = \frac{l}{v}, \text{ d'où } n = \frac{870 l}{v}.$$

*230. **Vibrations longitudinales des cordes.** — On a déjà vu que pour déterminer dans une corde tendue des vibrations longitudinales, on la frotte dans le sens de sa longueur avec un morceau de drap saupoudré de colophane (224).

On trouve par le calcul que les lois des vibrations longitudinales des cordes sont données par la formule $n = \frac{1}{rl} \sqrt{\frac{gQ}{\pi d}}$, n , r , l , g et d ayant la même signification que dans la formule des vibrations transversales, et Q étant le coefficient d'élasticité de la corde. On désigne sous ce nom le poids qui serait nécessaire pour donner à la corde une tension telle, qu'elle s'allongât d'une quantité égale à elle-même; allongement qui ne peut jamais se réaliser, la rupture ayant lieu bien auparavant.

De la formule ci-dessus on déduit quatre lois identiques avec celles déjà données pour les vibrations transversales.

CHAPITRE IV.

VIBRATION DE L'AIR DANS LES TUYAUX SONORES.

231. **Tuyaux sonores.** — On nomme *tuyaux sonores*, des tubes creux dans lesquels on produit des sons en faisant vibrer la colonne d'air qui y est renfermée. Dans les divers appareils décrits jusqu'ici, le son résulte des vibrations de corps solides; l'air n'en est que le véhicule. Dans les instruments à vent, lorsque les tuyaux ont leurs parois suffisamment résistantes, c'est la colonne d'air renfermée dans les tuyaux qui seule est le corps sonore. On constate, en effet, que la matière des tuyaux est sans influence sur le son; il est le même, à dimensions égales, que les tuyaux soient de bois, de cristal ou de métal. Le timbre seul est modifié.

Si l'on ne faisait que souffler dans les tuyaux, il n'y aurait pas de son, mais seulement un mouvement progressif continu de l'air. Pour qu'un son se produise, il faut, par un moyen quelconque, exciter dans l'air une succession rapide de condensations et de raréfactions, qui se propagent ensuite à toute la colonne d'air contenue dans le tuyau. De là, la nécessité de donner à l'*embouchure*, c'est-à-dire à l'extrémité du tuyau par laquelle arrive l'air, une forme convenable pour que celui-ci ne puisse entrer que par intermittences, et non d'une manière continue. D'après la disposition adoptée pour mettre ainsi l'air en vibration, les tuyaux sonores se divisent en *tuyaux à bouche* et en *tuyaux à anche*.

232. **Tuyaux à bouche.** — Dans les tuyaux à bouche toutes les

parties de l'embouchure sont fixes. Ces tuyaux sont de bois ou de métal, prismatiques ou cylindriques, et toujours d'une grande longueur par rapport à leur diamètre. La figure 152 représente un tuyau à bouche, et la figure 153 en montre une coupe longitudinale, qui permet de voir les détails intérieurs. Dans ce tuyau, la partie inférieure P, par laquelle arrive l'air, se nomme le *ped*;

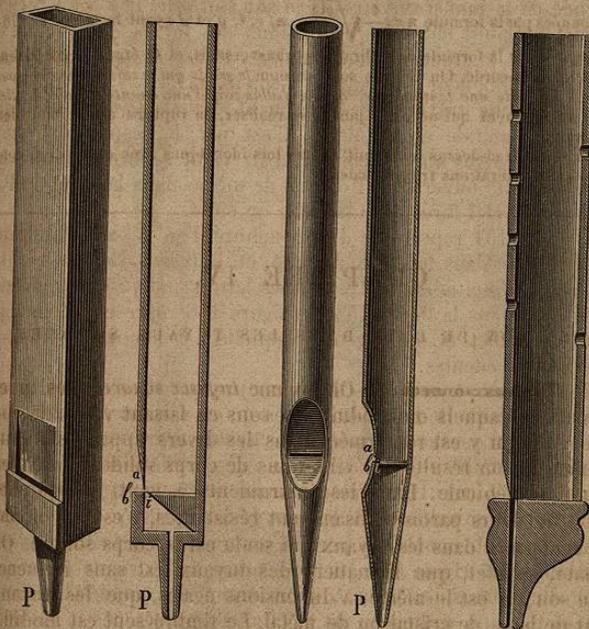


Fig. 152.

Fig. 153.

Fig. 154.

Fig. 155.

Fig. 156.

il sert à fixer le tuyau sur une soufflerie (fig. 157). A sa sortie du pied, l'air passe dans une fente étroite *i*, qu'on appelle la *lumière*. En regard de celle-ci est pratiquée, dans la paroi opposée, une ouverture transversale qui est la *bouche*; son bord *a*, taillé en biseau, est la *lèvre supérieure*, et le bord *b*, la *lèvre inférieure*. Cela posé, le courant d'air qui passe par la lumière se brise contre le biseau de la lèvre supérieure, s'y comprime, et, par un effet d'élasticité, réagit sur le courant qui continue d'arriver et l'arrête; mais cet arrêt n'a lieu que pendant un intervalle de temps très-court, parce que l'air s'échappant par la bouche, le courant

qui vient du pied reprend aussitôt, et ainsi de suite pendant tout le temps qu'on fait arriver l'air. De là résultent des pulsations qui se transmettent à l'air dans l'intérieur du tuyau, et y font naître une suite de demi-ondes sonores alternativement condensées et raréfiées (140). Ces ondes sont d'autant plus rapides que la vitesse du courant est plus grande, et que la lèvres supérieure est plus rapprochée de la lumière. Pour que le son soit pur, il y a un certain rapport à établir entre les dimensions des lèvres, l'ouverture de la bouche et la grandeur de la lumière. Enfin, le tuyau doit avoir une grande longueur par rapport à son diamètre.

Dans la flûte traversière, l'embouchure consiste en une simple ouverture latérale et circulaire. C'est par la disposition qu'on donne aux lèvres que le courant d'air vient se briser contre les bords de cette ouverture. Il en est de même dans la flûte de Pan et pour une clef forée avec laquelle on siffle.

La figure 154 représente l'embouchure d'un tuyau cylindrique très en usage dans les jeux d'orgue, et la figure 155 en montre une coupe longitudinale. Les mêmes lettres indiquent les mêmes pièces que dans la figure 153. La figure 156 représente l'embouchure du sifflet et du flageolet, laquelle a beaucoup de rapport avec les précédentes.

233. **Tuyaux à anche.** — Dans ces tuyaux, la colonne d'air est ébranlée à l'aide de lames élastiques qu'on nomme *anches*, et qui se divisent en *anches battantes* et en *anches libres*.

Anche battante. — Cette anche se compose d'une pièce de bois ou de métal *a* (fig. 158), qu'on nomme la *rigole*, et qui est creusée en forme de cuiller dans le sens de sa longueur. Elle est fixée à une espèce de bouchon *K* percé d'un trou, qui fait communiquer la cavité de la rigole avec un long tuyau *T*. La rigole est recouverte d'une lame de laiton *l*, qu'on nomme la *languette*. Celle-ci, dans sa position ordinaire, est légèrement écartée des bords de la rigole, mais étant très-flexible, elle peut s'en rapprocher facilement et la fermer. Enfin, un fil de fer *br*, qu'on désigne sous le nom de *rasette*, s'applique, par sa partie inférieure, qui est recourbée, sur la languette, et règle son écartement de la rigole. En enfonçant plus ou moins la rasette, on raccourcit ou l'on allonge la partie vibrante de la languette, ce qui permet d'augmenter ou de diminuer le nombre de ses vibrations.

L'anche est adaptée au haut d'un tuyau rectangulaire *KN* (fig. 157), qui est le *porte-vent*. Ce tuyau est fermé de toutes parts, excepté à son pied, qu'on fixe sur le sommet d'une soufflerie. Dans les cours de physique, pour laisser voir les vibrations de la languette, les parois du porte-vent, dans la partie qui correspond

à l'anche, sont de verre; c'est cette disposition qui est représentée dans la figure 157.

Lorsqu'on fait arriver l'air dans le porte-vent, il passe d'abord entre la languette et la rigole pour s'échapper par le tuyau *T*;

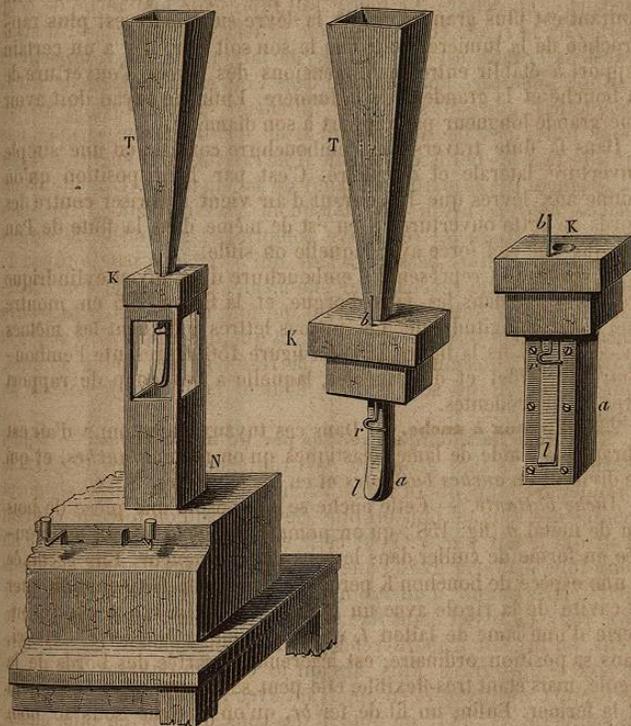


Fig. 157.

Fig. 158.

Fig. 159.

mais la vitesse du courant s'accélérait, la languette vient frapper les bords de la rigole, et la fermant complètement, le courant ne passe plus. Or, en vertu de son élasticité, la languette revient sur elle-même; puis elle est entraînée de nouveau aussitôt que le courant passe, et ainsi de suite, en sorte que l'air ne passant que par intermittences du porte-vent dans le tuyau *T*, il se produit dans celui-ci la même série de pulsations que dans les tuyaux à bouche; d'où résulte un son d'autant plus élevé que le courant d'air est plus rapide.

Anche libre. — Grenié, en 1810, a inventé une espèce d'anche qu'on nomme *anche libre*, parce que la languette, au lieu de battre sur les bords de la rigole, comme dans l'anche décrite ci-dessus, entre dans la rigole en rasant ses bords de manière à osciller en dedans et en dehors. La figure 159 représente une anche de cette sorte. Ici la rigole consiste en une petite caisse de bois *a*, dont la paroi antérieure est une plaque de laiton. Au milieu de celle-ci est une ouverture longitudinale dans l'intérieur de laquelle est la languette *l*, qui peut s'infléchir librement en avant et en arrière pour livrer passage au courant d'air qu'elle arrête chaque fois qu'elle rase les bords de la fente. Une rasette *r* sert encore à régler la longueur de la partie vibrante de la languette. L'anche étant placée dans le tuyau KN, lorsqu'un courant d'air arrive dans celui-ci, la languette se trouve comprimée, se courbe de dehors en dedans, et livre passage à l'air qui s'échappe par le tuyau T. Mais la languette revenant sur elle-même, en vertu de son élasticité, forme une suite d'oscillations qui font que la rigole se trouve successivement ouverte et fermée, et que le courant d'air passe et s'arrête par intermittences; de là résultent des ondes sonores, qui produisent un son dont la hauteur croît avec la vitesse du courant.

234. **Sons harmoniques rendus par un même tuyau.** — Daniel Bernouilli, célèbre géomètre de Groningue, mort en 1782, a le premier reconnu qu'un même tuyau sonore peut successivement rendre des sons de plus en plus élevés lorsqu'on force le courant d'air qui le fait *parler*. Pour cette expérience, on fait usage d'un long tube de verre fixé à l'une des embouchures décrites ci-dessus (232), mais munie d'un robinet qui sert à régler le courant d'air (fig. 162). Ce tuyau étant fixé sur une soufflerie, en ménageant le vent, on lui fait d'abord rendre le son fondamental, c'est-à-dire le son le plus grave. Puis, forçant le vent en ouvrant davantage le robinet du tuyau et en appuyant avec la main sur la tige T de la soufflerie (fig. 144), on obtient des sons de plus en plus élevés dans l'ordre suivant :

1° Si le tuyau est ouvert à son extrémité opposée à l'embouchure, et si l'on représente par 1 le son fondamental, les sons qui viennent après lui sont successivement 2, 3, 4, 5, 6, 7, ... c'est-à-dire successivement tous les harmoniques du son fondamental (217).

2° Si le tuyau est fermé à l'extrémité opposée à l'embouchure, il ne rend que les sons 1, 3, 5, 7, 9, ... c'est-à-dire seulement les harmoniques de rang impair.

Dans les deux cas, quelque tentative que l'on fasse, on ne peut

tirer d'un même tuyau toutes les notes de l'échelle musicale, mais seulement des harmoniques du son fondamental.

235. **Nœuds et ventres de vibration dans les tuyaux sonores.** — Les rapports des sons successifs rendus par un même tuyau

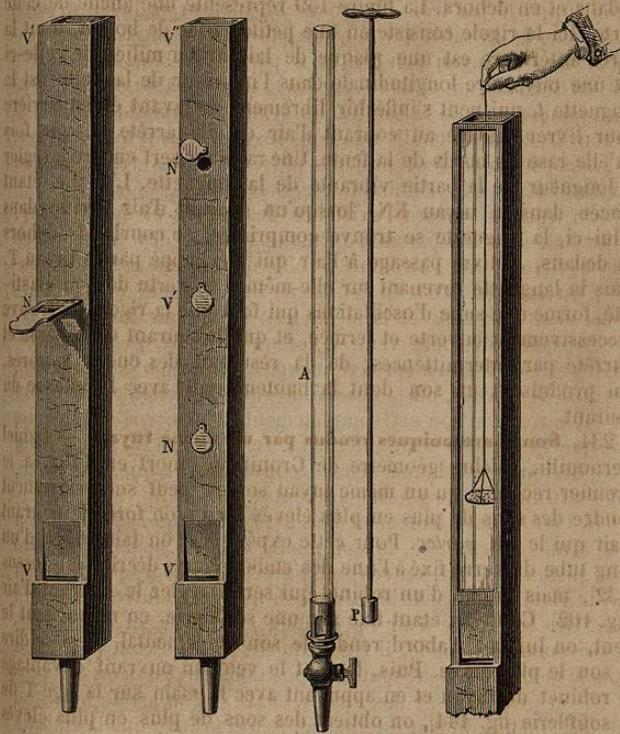


Fig. 160.

Fig. 161.

Fig. 162.

Fig. 163.

sonore indiquent que la colonne d'air contenue dans le tuyau se subdivise en parties aliquotes de plus en plus courtes, vibrantes à l'unisson. En effet, la théorie et l'expérience font voir qu'il existe dans la colonne d'air, de distance en distance, des tranches fixes qui sont des *nœuds*; et qu'entre deux nœuds consécutifs il se rencontre toujours une section où l'air atteint un maximum de vibration, c'est un *ventre*. Le caractère des nœuds, c'est que l'air n'y vibre pas, mais subit des variations continues de densité et

de pression ; tandis que le caractère des ventres, c'est que l'air y vibre constamment sans changer de densité ni de pression.

Plusieurs expériences servent à constater l'existence des nœuds et des ventres de vibration dans les tuyaux sonores.

1^o On colle une membrane de baudruche sur un anneau de carton supporté par trois fils comme un plateau de balance, puis, ayant répandu du sable sur la baudruche, on descend le tout lentement dans un tuyau pendant qu'il parle (fig. 163). Or, de distance en distance, on observe que les grains de sable ne reçoivent aucun mouvement de la baudruche et restent immobiles, c'est là que sont les nœuds ; tandis que dans les positions intermédiaires, les grains de sable sont projetés plus ou moins vivement par les vibrations que la membrane reçoit de l'air.

2^o On constate encore l'existence des nœuds et des ventres, en perceant, dans les parois d'un tuyau sonore, des trous qu'on peut ouvrir ou fermer à volonté à l'aide d'obturateurs mobiles autour d'un axe (fig. 161). La densité de l'air, comme on l'a dit ci-dessus, étant constante et la même qu'à l'extérieur dans les parties correspondantes aux ventres, lorsqu'on ouvre un trou en regard de ceux-ci, le son n'éprouve aucune modification. Au contraire, en regard des nœuds, où la densité de l'air est variable, dès qu'un trou est ouvert, le son est complètement changé ; ce qui résulte de ce que la tranche d'air intérieure, se trouvant à la pression atmosphérique, prend une densité constante, et que, par suite, là où était un nœud, se forme un ventre.

3^o Si l'on enfonce lentement dans le tuyau A (fig. 162) un piston P fixé à une longue tige, le son monte d'abord, mais, à mesure que le piston descend, on rencontre une ou plusieurs positions où le tuyau rend exactement le même son qu'avant l'introduction du piston. Or, la couche d'air en contact avec celui-ci étant alors nécessairement immobile, il fallait qu'elle le fût avant, puisqu'on entend le même son. Donc toutes les positions du piston où se reproduit le son primitif sont des nœuds. Mais si l'on arrête le piston entre deux nœuds, le son est changé, ce qui prouve que la tranche d'air qui est maintenant immobile ne l'était pas d'abord.

4^o Enfin, nous citerons encore l'expérience suivante qui est nouvelle, et que nous avons vue pour la première fois chez M. Kœnig, constructeur d'appareils d'acoustique, à Paris. Sur une des parois d'un tuyau rectangulaire est une caisse P, dans laquelle arrive du gaz d'éclairage par un tuyau de caoutchouc S (fig. 164). De cette caisse partent trois tubes de caoutchouc *a, a, a*, qui conduisent le gaz à autant de petites chambres pratiquées dans la paroi antérieure du tuyau. Une d'elles est représentée en M, sur la gauche du dessin.

C'est une cavité cylindrique, fermée postérieurement par une membrane de baudruche *r*, et antérieurement par un disque de bois percé de deux trous, l'un par lequel arrive le gaz, et l'autre auquel est adapté un bec *m* par lequel le gaz se dégage.

Les trois becs étant allumés, si l'on fait rendre d'abord au tuyau le son fondamental, les deux becs A et C brûlent avec calme, tandis que le bec B s'éteint. Or, on va voir ci-après (fig. 168) qu'en B il y a un nœud, c'est-à-dire une tranche subissant constamment des variations de pression et de densité ; ce sont celles-ci qui, faisant vibrer la membrane *r*, sont cause que le bec s'éteint.

Maintenant, si l'on recommence l'expérience en soufflant tout d'un coup avec force pour obtenir le son 2, ce n'est plus le bec B qui s'éteint, mais les deux becs A et C. En effet, la colonne se divise comme le montre la figure 169 ci-après ; c'est-à-dire qu'en B est un ventre, et en A et C des nœuds.

Dans toutes ces expériences, on constate que, dans un même tuyau, ouvert ou fermé, quelque soit le nombre des nœuds, ils sont toujours également distants entre eux, et que le milieu entre deux nœuds est toujours un ventre.

236. **Disposition des nœuds et des ventres.** — *Tuyaux fermés.* — Dans ces

tuyaux, auxquels les organistes donnent le nom de *bourdons*, le fond opposé à l'embouchure est toujours un nœud, puisque la couche d'air en contact avec lui est nécessairement immobile et ne subit que des variations de densité. A la bouche, au contraire, où l'air conserve une densité constante, celle de l'atmosphère, et où le mouvement vibratoire est maximum, se trouve toujours un ventre. Dans tout tuyau fermé, il y a donc au moins un nœud et un ventre (fig. 165) ; c'est alors que le tuyau rend le son fondamental, et la distance VN du ventre au nœud égale une demi-onde condensée ou raréfiée, ou, ce qui est la même chose, égale le quart de la longueur totale de l'ondulation complète (197).

A partir de là, si l'on force le vent, la bouche restant toujours

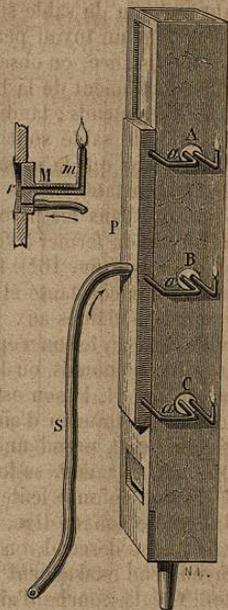


Fig. 164.

un ventre et le fond un nœud, la colonne d'air se subdivise en trois parties égales (fig. 166), et il se produit un nœud et un ventre intermédiaires. Or, la distance VN entre un nœud et un ventre consécutifs étant toujours le quart de la longueur d'ondulation, celle-ci est devenue trois fois plus petite, et par suite le nombre des vibrations trois fois plus grand, puisqu'on a vu que le nombre des vibrations est en raison inverse de la longueur d'onde (223).

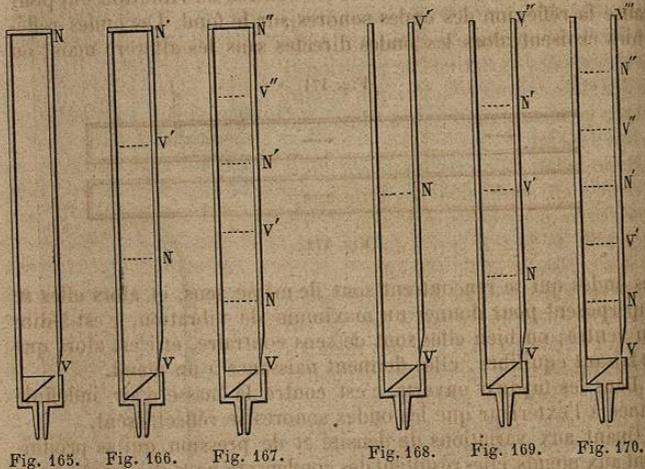


Fig. 165.

Fig. 166.

Fig. 167.

Fig. 168.

Fig. 169.

Fig. 170.

Par suite, si l'on représente par 1 le son fondamental, on a actuellement le son 3. Le son qui vient après correspond à deux nœuds et deux ventres intermédiaires (fig. 167). La distance VN étant cinq fois moindre, on a le son 5, et ainsi de suite : ce qui fait voir comment les tuyaux fermés rendent successivement les sons 1, 3, 5, 7, ... ainsi qu'on l'a déjà constaté par l'expérience (234).

Tuyaux ouverts aux deux bouts. — Dans ces tuyaux, les tranches d'air à la bouche et à l'extrémité opposée conservant nécessairement une densité constante, celle de l'atmosphère, il y a toujours un ventre à chaque extrémité et au moins un nœud entre les deux (fig. 168). On a alors le son fondamental, et la longueur d'onde complète, qui est toujours quatre fois la distance d'un nœud à un ventre, est double de la longueur du tuyau.

Si l'on force le vent, il se produit deux nœuds et un ventre intermédiaires (fig. 169), et la longueur d'onde étant deux fois moindre,

on a le son 2. Puis la colonne d'air se subdivisant en trois nœuds et deux ventres intermédiaires (fig. 170), la longueur d'onde est trois fois moindre, d'où résulte le son 3; et ainsi de suite. D'où l'on voit comment les tuyaux ouverts rendent successivement tous les sons 1, 2, 3, 4, 5, ...

237. Origine des nœuds et des ventres de vibration. — Dans les tuyaux fermés, les nœuds et les ventres de vibration ont pour cause la réflexion des ondes sonores sur le fond. Les ondes réfléchies croisent alors les ondes directes sans les altérer; mais, ou

Fig. 171.



Fig. 172.

les ondes qui se rencontrent sont de même sens, et alors elles se superposent pour donner un maximum de vibration, c'est-à-dire un ventre; ou bien elles sont de sens contraire, et c'est alors que se faisant équilibre, elles donnent naissance à un nœud.

Dans les tuyaux ouverts, c'est contre la masse d'air indéfinie située à l'extérieur que les ondes sonores se réfléchissent.

Quant aux variations de densité et de pression qui se produisent aux nœuds, elles résultent des condensations et des raréfactions successives des ondes, en vertu desquelles les tranches d'air s'approchent et s'éloignent alternativement des nœuds. Si les ondes marchent les unes vers les autres, comme le montre les flèches dans la figure 171, il y a condensation; au contraire, lorsque les ondes s'éloignent (fig. 172), il y a dilatation; mais, dans les deux cas, les vitesses étant égales et de signes contraires, la tranche de séparation, ou le nœud, est toujours immobile.

238. Formules des tuyaux sonores. — De ce qui précède il découle que la colonne d'air, dans les tuyaux fermés, est toujours partagée par des nœuds et des ventres de vibration en un nombre impair de parties égales entre elles et égales au quart de la longueur d'onde complète (fig. 165, 166 et 167); et dans les tuyaux ouverts, en un nombre pair (fig. 168, 169 et 170). Si donc on représente la longueur du tuyau par L , par l la longueur de l'onde complète, et par p un nombre entier quelconque, en sorte que $2p$ soit un nombre pair, et $2p + 1$ un

nombre impair, on a, pour les tuyaux fermés, $L = (2p + 1) \frac{l}{4}$ [1]; et pour les

tuyaux ouverts, $L = 2p \times \frac{l}{4}$, ou $L = p \times \frac{l}{2}$ [2].

En remplaçant dans les formules [1] et [2] l par sa valeur $\frac{v}{n}$ tirée de l'équation $v = ln$ (223), v étant la vitesse du son dans l'air, et n le nombre de vibrations par seconde, il vient

$$L = (2p + 1) \frac{v}{4n}, \text{ et } L = p \frac{v}{2n}.$$

D'où l'on tire, pour les tuyaux fermés, $n = \frac{(2p + 1)v}{4L}$ [3], et pour les tuyaux ouverts $n = \frac{pv}{2L}$ [4].

Or, si dans la formule [3], on donne à p successivement les valeurs 0, 1, 2, 3, ... on obtient $n = \frac{v}{4L}$, $3 \cdot \frac{v}{4L}$, $5 \cdot \frac{v}{4L}$, $7 \cdot \frac{v}{4L}$, ...; c'est-à-dire que les tuyaux fermés rendent le son fondamental $\frac{v}{4L}$, et tous ses harmoniques de rang impair; ce qui est conforme à l'expérience (234).

De même, si dans la formule [4], on donne à p les valeurs 1, 2, 3, 4, 5, ... il vient $n = \frac{v}{2L}$, $2 \cdot \frac{v}{2L}$, $3 \cdot \frac{v}{2L}$, $4 \cdot \frac{v}{2L}$, $5 \cdot \frac{v}{2L}$, ...; c'est-à-dire que les tuyaux ouverts rendent le son fondamental $\frac{v}{2L}$ et tous ses harmoniques, tant de rang pair que de rang impair.

239. **Loi des longueurs.** — Les formules [3] et [4] montrent que, dans les tuyaux ouverts, aussi bien que dans les tuyaux fermés, le nombre des vibrations est en raison inverse de la longueur des tuyaux. Cette loi, qui est connue sous le nom de loi des longueurs, se vérifie expérimentalement en faisant vibrer deux tuyaux de même espèce, l'un double de l'autre : on trouve que le plus court donne l'octave aiguë du plus long.

Enfin, si l'on compare le son fondamental d'un tuyau fermé à celui d'un tuyau ouvert de même longueur, les formules [3] et [4] ci-dessus font voir que le nombre des vibrations du tuyau ouvert est double, et par suite que le son fondamental d'un tuyau ouvert est à l'octave aiguë de celui du tuyau fermé de même longueur; ce qu'on peut encore exprimer, d'après la loi des longueurs, en disant que le son fondamental rendu par un tuyau fermé est le même que celui rendu par un tuyau ouvert de longueur double. On vérifie cette dernière loi au moyen d'un tuyau ouvert aux deux bouts, muni en son milieu d'un diaphragme à coulisse, percé d'une ouverture carrée égale à la section du tuyau (fig. 160). Quand le diaphragme est enfoncé, le tuyau est ouvert dans toute sa longueur; mais il est fermé en son milieu, lorsque le diaphragme est dans la position représentée par le dessin. Dans ce cas, on a le son fondamental d'un tuyau fermé de longueur VN. Puis, lorsque le diaphragme est rentré, on a le son fondamental d'un tuyau ouvert

de longueur double VV'. Or, dans les deux cas, le son est le même.

240. **Lois de Bernoulli.** — En résumant tout ce qui précède sur les tuyaux sonores, on conclut les lois suivantes, connues sous le nom de lois de Bernoulli, parce que c'est lui qui, le premier, les a posées.

Lois des tuyaux fermés. — 1° Un tuyau fermé d'un bout et muni d'une embouchure à bouche ou à anche à l'autre bout, étant fixé sur la table d'une soufflerie, rend des sons de plus en plus élevés à mesure qu'on force le vent; et si l'on représente par 1 le son le plus grave, ou le son fondamental, on trouve que le tuyau rend successivement les sons 1, 3, 5, 7, 9, ... représentés par la série des nombres impairs.

2° Pour les tuyaux inégaux, les sons de même ordre correspondent à des nombres de vibrations qui sont en raison inverse des longueurs des tuyaux.

3° Les vibrations de l'air, dans les tuyaux, sont longitudinales, et la colonne d'air vibrante est partagée en parties égales par des nœuds et des ventres, le fond des tuyaux étant toujours un nœud et l'embouchure un ventre.

4° Les nœuds, ou les surfaces de séparation des parties vibrantes, sont immobiles et n'éprouvent que des changements de densité, tandis que les ventres, ou les milieux des parties vibrantes, conservent la même densité, mais sont constamment en vibration.

5° Dans le cas d'un seul nœud, le tuyau rend le son fondamental, et la longueur de l'onde complète égale quatre fois celle du tuyau.

Lois des tuyaux ouverts. — Les lois des tuyaux ouverts aux deux bouts ne diffèrent des lois précédentes qu'en ce que les sons rendus par un même tuyau sont successivement représentés par la suite naturelle des nombres 1, 2, 3, 4, 5, 6, ... et qu'en ce que les extrémités des tuyaux sont toujours des ventres.

De plus, le son fondamental d'un tuyau ouvert par les deux bouts est toujours l'octave aiguë du même son dans un tuyau ouvert par un seul. Enfin, la longueur d'onde égale deux fois celle du tuyau.

241. **Les lois de Bernoulli ne sont qu'approchées.** — Les lois de Bernoulli ne se vérifient pas rigoureusement par l'expérience. Que les tuyaux soient à bouche ou à anche, on obtient des sons plus graves que ne l'indique la théorie. De plus, la distance du premier nœud à l'embouchure est toujours moindre que la distance théorique; au contraire, dans les tuyaux fermés, la distance du fond au premier ventre est plus grande que celle donnée par les lois de Bernoulli.

Pour que ces lois s'accordassent avec l'expérience, il faudrait des tuyaux dont la section fût infiniment petite par rapport à la

longueur, et l'air devrait être mis directement en vibration sur tout le pourtour du tuyau, et non sur un seul côté, comme on le fait habituellement.

242. **Problèmes sur les tuyaux sonores.** — I. Un tuyau ouvert donnant pour troisième harmonique re_3 , quelle est la longueur de ce tuyau en mètres, la température de l'air étant de 10 degrés ?

On sait que la_3 correspond à 435 vibrations doubles par seconde (222), et que le rapport de ut à la est 1 à $\frac{5}{3}$; on a donc $ul_3 \times \frac{5}{3} = 435$, d'où $ul_3 = 261$. ul_3 une fois connu, on en déduit re_3 en multipliant 261 par $\frac{9}{8}$, qui représente le nombre relatif de vibrations de re par rapport à ut (218); donc

$$re_3 = 261 \times \frac{9}{8} = 293 \frac{5}{8}.$$

Cela posé, on sait que dans les tuyaux ouverts on a la relation $n = p \cdot \frac{v}{2L}$ (238), n étant le nombre des ondes sonores complètes par seconde; v la vitesse du son dans l'air, laquelle à 10 degrés est de 337 mètres; L la longueur du tuyau de la bouche à l'extrémité, et p un nombre entier quelconque.

Faisant $p=4$ pour avoir le son 4, ou le troisième harmonique, il vient

$$n = \frac{4v}{2L}, \text{ d'où } L = \frac{2v}{n} = \frac{2 \cdot 337}{293 + \frac{5}{8}} = 2^m, 29.$$

II. On demande le rang dans l'échelle musicale de l'harmonique 5, lorsqu'il est rendu, à la température de 10 degrés, par un tuyau fermé de 3^m, 23 de longueur ?

La formule des tuyaux fermés étant $L = (2p+1) \frac{v}{4n}$ (238), en y faisant $p=2$ pour avoir le son de troisième rang, c'est-à-dire l'harmonique 5, il vient

$$L = \frac{5v}{4n}, \text{ d'où } n = \frac{5v}{4L} = \frac{5 \cdot 337^m}{4 \cdot 3^m, 23} = 130,4.$$

Or, on a vu que ul_2 correspond à 130,5 vibrations complètes (222), donc l'harmonique 5 du tuyau donné est ul_2 .

III. Un tuyau ouvert donne un son de 100 vibrations par seconde, lorsqu'on y souffle de l'air à 10 degrés; quelle devrait être la température de l'air introduit, pour que le son rendu fût la quinte majeure du premier ?

On sait que le son fondamental étant 1, la quinte majeure est $\frac{3}{2}$ (216); c'est-à-dire que les deux sons qui donnent la quinte sont entre eux comme 2 est à 3. Par conséquent, le son donné étant 100, le son cherché est 150.

Cela posé, la formule des tuyaux ouverts étant $L = p \frac{v}{2n}$ (238), si l'on y fait $p=1$, on trouve, pour le son fondamental, $L = \frac{v}{2n}$; d'où l'on déduit, pour le premier son, $L = \frac{v'}{200}$, et pour le second, $L = \frac{v''}{300}$, v' étant la vitesse du son à 10 degrés, et v'' sa vitesse à t° . De ces deux égalités on tire $\frac{v'}{200} = \frac{v''}{300}$. Or, on sait (202) que $v' = v \sqrt{1+10\alpha}$, et $v'' = v \sqrt{1+\alpha t}$. On a donc

$$\frac{v \sqrt{1+10\alpha}}{200} = \frac{v \sqrt{1+\alpha t}}{300}, \text{ ou } \frac{1}{2} \sqrt{1+10\alpha} = \frac{1}{3} \sqrt{1+\alpha t};$$

en élevant au carré et réduisant, on a enfin

$$9(1+10\alpha) = 4(1+\alpha t), \text{ ou } 5+90\alpha = 4\alpha t;$$

résolvant cette dernière équation par rapport à t , et remplaçant α par sa valeur 0,00367 (290), on trouve $t = 363^\circ$.

IV. Un tuyau ouvert et un bourdon (tuyau fermé) ont une longueur commune de 2 mètres; on demande : 1° quel est le rapport musical qui existe entre les seconds harmoniques de ces tuyaux; 2° quel est le nombre absolu de vibrations qui caractérise l'un ou l'autre de ces tuyaux. — La température est de 20 degrés, le coefficient de dilatation de l'air 0,00367, et la vitesse du son dans l'air à zéro 333 mètres.

1° On sait que le son fondamental étant 1, le tuyau ouvert rend les harmoniques 2, 3, 4, 5, 6... et le tuyau fermé les harmoniques 3, 5, 7... (234). Les seconds harmoniques que l'on compare sont donc 3 et 5; mais, comme dans les tuyaux ouverts, un harmonique quelconque est à l'octave aigüe de l'harmonique de même rang dans les tuyaux fermés de même longueur (240), les nombres relatifs de vibrations des deux sons que l'on compare ne sont pas 3 et 5, mais

6 et 5; leur rapport est donc $\frac{6}{5}$ c'est-à-dire la tierce mineure (216).

2° Pour calculer le nombre absolu de vibrations qui caractérise un de ces deux sons, celui rendu par le tuyau ouvert, par exemple, prenons la formule

$$n = p \cdot \frac{v'}{2L}, \text{ qui est celle des tuyaux ouverts, et dans laquelle } v' \text{ représente la}$$

vitesse du son dans l'air à t degrés.

En y faisant $p=3$, pour avoir le second harmonique, et $v' = v \sqrt{1+\alpha t}$ (202),

il vient $n = \frac{3v \sqrt{1+\alpha t}}{2L}$; ou remplaçant v , t , L par les valeurs données dans l'é-

$$\text{noncé, } n = \frac{3 \cdot 333 \sqrt{1+0,00367 \times 20}}{4} = 258,7.$$

Si l'on voulait calculer le nombre absolu de vibrations du deuxième son, on prendrait la formule $n' = \frac{(2p+1)v'}{4L}$; y faisant $p=2$ pour avoir le deuxième harmonique, on trouve

$$n' = \frac{5v \sqrt{1+\alpha t}}{4L} = \frac{5 \cdot 333 \sqrt{1+0,00367 \times 20}}{8} = 215,6$$

Si l'on prend le rapport des deux nombres 258,7 et 215,6, on vérifie qu'il est bien égal à $\frac{6}{5}$.

* CHAPITRE V.

VIBRATIONS DES VERGES, DES LAMES, DES PLAQUES ET DES MEMBRANES.

243. **Vibrations des verges et des lames.** — Les verges et les lames minces, de bois, de verre, de métal, et surtout d'acier trempé, vibrent en vertu de leur élasticité, et présentent, comme les cordes, deux sortes de vibrations, les unes

transversales, les autres longitudinales. On fait naître les premières en fixant les verges et les lames par un bout, et en passant un archet sur la partie libre. On produit les vibrations longitudinales dans une verge en la fixant en l'un de ses

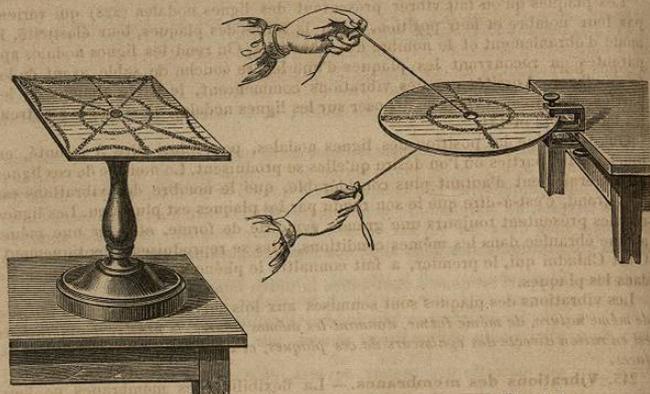


Fig. 173.

Fig. 174.

points, et en la frottant, dans le sens de sa longueur, avec un morceau de drap mouillé ou saupoudré de colophane. Toutefois, dans ce dernier cas, on n'obtient un son qu'autant que le point de la verge qu'on a fixée en marque la moitié, le tiers, le quart, en un mot, une partie aliquote.

On démontre, par le calcul, que le nombre des vibrations transversales des verges

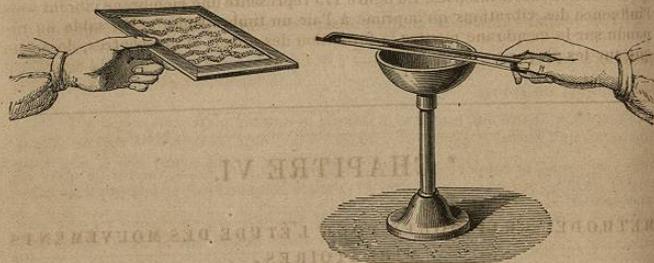


Fig. 175.

et des lames de même nature est en raison directe de leur épaisseur et en raison inverse du carré de leur longueur. La largeur des lames n'a pas d'influence sur le nombre des vibrations qu'elles peuvent rendre; elle fait seulement varier la force nécessaire pour les ébranler.

Dans les verges élastiques de même nature, le nombre des vibrations longitudinales est en raison inverse de leur longueur, quels que soient leur diamètre et la forme de leur section transversale.

244. Vibrations des plaques. — Lorsqu'on veut mettre une plaque en vibration, on la fixe par son centre, comme le représente la figure 173, et on l'ébranle

sur ses bords au moyen d'un archet; ou bien on la fixe par quelque point de sa surface, et on l'ébranle à son centre percé, pour cela, d'une ouverture dans laquelle on détermine un frottement à l'aide de crins enduits de colophane (fig. 174).

Les plaques qu'on fait vibrer présentent des lignes nodales (228) qui varient par leur nombre et leur position, selon la forme des plaques, leur élasticité, le mode d'ébranlement et le nombre des vibrations. On rend les lignes nodales apparentes en recouvrant les plaques d'une légère couche de sable avant de les faire vibrer. Aussitôt que les vibrations commencent, le sable abandonne les parties vibrantes, et vient se déposer sur les lignes nodales, ainsi que le montrent les figures 173 et 174.

On détermine la position des lignes nodales, pour ainsi dire à volonté, en touchant les parties où l'on désire qu'elles se produisent. Le nombre de ces lignes est généralement d'autant plus considérable, que le nombre des vibrations est plus grand, c'est-à-dire que le son rendu par les plaques est plus aigu. Les lignes nodales présentent toujours une grande symétrie de forme, et pour une même plaque ébranlée dans les mêmes conditions, elles se reproduisent identiquement. C'est Chladni qui, le premier, a fait connaître le phénomène des lignes nodales dans les plaques.

Les vibrations des plaques sont soumises aux lois suivantes: *Pour des plaques de même nature, de même forme, donnant les mêmes figures, le nombre des vibrations est en raison directe des épaisseurs de ces plaques, et en raison inverse de leurs surfaces.*

245. Vibrations des membranes. — La flexibilité des membranes ne leur permet pas de vibrer, si elles ne sont tendues comme la peau d'un tambour. Elles rendent alors un son d'autant plus aigu, qu'elles sont de plus petite dimension et plus fortement tendues. Pour obtenir des membranes vibrantes, Savart collait, sur des cadres de bois, de la baudruche très-flexible.

Les membranes peuvent vibrer par percussion, comme dans le tambour, ou par influence. En effet, Savart a observé qu'une membrane peut vibrer sous l'influence des vibrations de l'air, quel que soit le nombre de ces vibrations, pourvu qu'elles soient assez intenses. La figure 175 représente une membrane vibrant sous l'influence des vibrations qu'imprime à l'air un timbre sonore. Du sable fin répandu sur la membrane montre la formation des nœuds et des ventres, de même que sur les plaques.

* CHAPITRE VI.

MÉTHODES GRAPHIQUES POUR L'ÉTUDE DES MOUVEMENTS VIBRATOIRES.

246. Méthode de M. Lissajous pour rendre les vibrations apparentes. — Dans l'étude des vibrations des plaques et des membranes, on a vu ci-dessus comment on rend apparent leur mouvement vibratoire en les saupoudrant de sable léger. Or, M. Lissajous a récemment adopté une méthode qui, non-seulement rend visible le mouvement vibratoire des corps sonores, soit directement, soit par projection sur un écran, mais encore permet de comparer, sans le secours de l'oreille, les mouvements vibratoires de deux corps sonores, de façon à reconnaître le rapport exact des vibrations qu'ils exécutent dans le même temps.

Cette méthode, fondée sur la persistance des sensations visuelles sur la rétine, consiste à fixer sur le corps vibrant un petit miroir métallique qui vibre avec lui,