il existe des points ou des lignes *relativement fixes*. Ce sont ces points et ces lignes qu'on désigne sous les noms de *nœuds* et de *lignes nodales*. Les parties vibrantes comprises entre deux lignes nodales ou deux nœuds consécutifs se nomment *concamérations*. Le milieu d'une concamération s'appelle un *ventre de vibration* : c'est là que les vibrations atteignent leur maximum d'amplitude.

Les cordes vibrantes présentent des exemples curieux de nœuds et de ventres quand on ne fait vibrer qu'une partie aliquote de leur longueur, c'est-à-dire un tiers, un quart, un cinquième. Pour cela, on fixe la corde à ses deux bouts et l'on fait glisser dessous un petit chevalet, en l'arrêtant successivement au tiers, au quart, au cinquième de la corde. Le chevalet étant au tiers, comme le représente la figure (407, I), on fait vibrer la portion BD avec un archet;

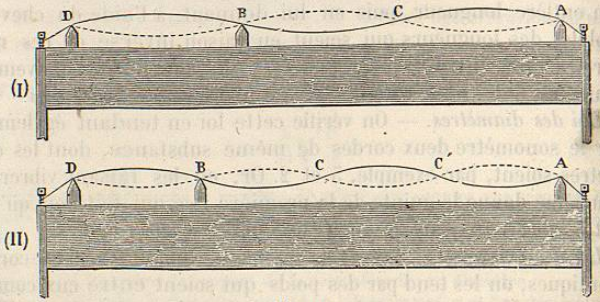

Fig. 407.

l'autre portion AB se subdivise alors spontanément en deux parties AC et CB, qui vibrent séparément, le point C demeurant sensiblement fixe. En effet, en plaçant de petits chevrons de papier, l'un en C, un autre entre B et C, un troisième entre C et A, celui qui est en C n'éprouve qu'un léger ébranlement, tandis que les deux autres sont projetés au loin. Il y a donc un nœud au premier point et des ventres aux deux autres. Si le chevalet B est au quart de la corde, il se produit entre A et B deux nœuds et trois ventres (fig. 407, II); s'il est au cinquième, il se forme entre les mêmes points trois nœuds et quatre ventres, et ainsi de suite.

Lorsqu'une corde un peu longue vibre dans son entier, une oreille exercée distingue, outre le son fondamental, les *harmoniques* 2, 3, 4, 5, c'est-à-dire l'octave aiguë du son fondamental, la quinte de l'octave, la double octave et la tierce majeure.

Le même phénomène se produit dans tous les corps vibrants, ainsi qu'on le verra bientôt dans les tuyaux sonores (380). La production de ces harmoniques est une conséquence directe de la subdivision spontanée du corps sonore en concamérations plus ou moins nombreuses.

376. **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. Les lois des vibrations longitudinales des cordes ont été trouvées par le calcul. Il y en a qui sont analogues aux lois des vibrations transversales, et qui sont résumées par une formule analogue à la formule précédente :

$$n = \frac{1}{rl}\sqrt{\frac{gE}{\pi d}}.$$

Dans cette formule les coefficients n, r, l, g et d ont la même signification que dans la formule des vibrations transversales, et E représente le *coefficient d'élasticité* de la corde. On nomme ainsi le *poids par lequel il faudrait tendre la corde pour qu'elle s'allongeât d'une quantité égale à elle-même* (allongement qui ne peut jamais se réaliser, la rupture ayant lieu bien auparavant). Ce coefficient étant toujours un nombre considérable, il en résulte que la fraction $\frac{gE}{\pi d}$ est beaucoup plus grande (toutes choses égales d'ailleurs) que la fraction $\frac{gP}{\pi d}$ et que, par suite, les vibrations longitudinales d'une corde sont beaucoup plus rapides que ses vibrations transversales : les sons rendus par une corde qui vibre *longitudinalement* sont donc *beaucoup plus aigus* que les sons rendus quand elle vibre *transversalement*.

CHAPITRE V

VIBRATIONS DE L'AIR DANS LES TUYAUX SONORES.

377. **Tuyaux sonores : Définitions.** — Dans les divers appareils décrits jusqu'ici, le son résulte des vibrations des corps solides que nous avons appelés *corps sonores;* l'air n'en est que le véhicule. Pour les sons rendus par les instruments à vent, c'est la colonne d'air contenue dans leurs tuyaux qui seule est le corps sonore. Cela résulte de ce fait d'expérience que *la matière des tuyaux est sans influence sur le son des instruments à vent; il est le même pour des tuyaux de dimensions égales, mais de substances différentes* (*bois, cristal ou métal*); *le timbre seul est modifié.*

On nomme en général *tuyaux sonores* des tubes, à parois résistantes, dans lesquels on produit des sons en faisant vibrer la colonne d'air qui y est contenue.

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 communiquent à toute la colonne d'air. De là la nécessité de donner au tuyau sonore une *embouchure*, c'est-à-dire une ouverture de forme convenable pour que l'air qu'on y insuffle n'y 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 deux catégories, les *tuyaux à bouche* et les *tuyaux à anche*.

378. **Tuyaux à bouche : Description** et **Jeu.** — 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 section.

La figure 408, I, représente, en perspective, un tuyau à bouche et la figure 408, II, en montre une coupe longitudinale. Dans ce tuyau, la partie inférieure P*i*, par laquelle arrive l'air, est le *pied;* celui-ci sert à fixer le tuyau sur une soufflerie. A sa sortie du pied, l'air passe dans une fente étroite *i*, qu'on appelle

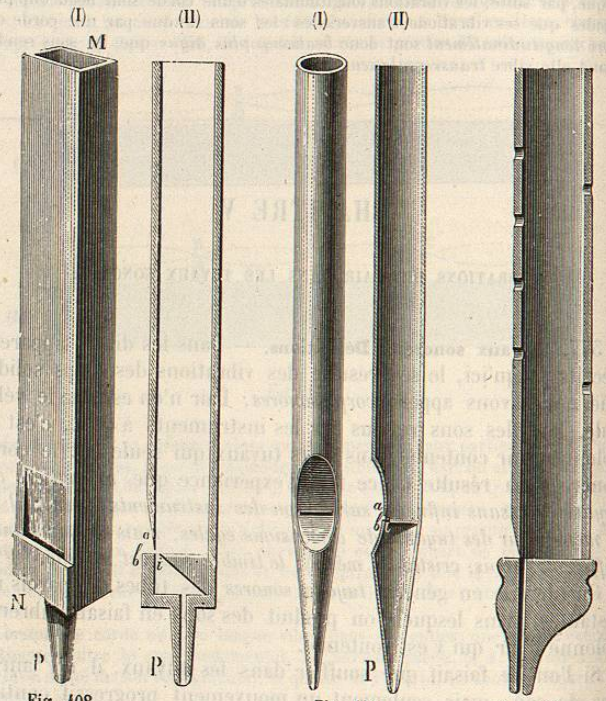

Fig. 408. Fig. 409. Fig. 410.

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*.

Le courant d'air qui passe par la lumière se brise contre 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 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 toute la durée de l'insufflation. De là des pulsations qui se transmettent à l'air dans le tuyau et y font naître une suite de demi-ondes sonores, alternativement condensées et dilatées. Ces ondes sont d'autant plus rapides que la vitesse du courant est plus grande et que la lèvre

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 sa section.

Dans la *flûte traversière*, l'embouchure consiste en une simple ouverture latérale 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 pour la *flûte de Pan* et pour une clef forée avec laquelle on siffle.

La figure 409, I, représente, en perspective, l'embouchure d'un tuyau cylindrique fort en usage dans les jeux d'orgue et la figure 409, II, en montre une coupe longitudinale. Les mêmes lettres indiquent les mêmes pièces que dans la figure 408, II.

La figure 410 représente en coupe l'embouchure du sifflet et du flageolet, laquelle a beaucoup de rapport avec les précédentes.

379. **Tuyaux à anche : Description** et **Jeu.** — Dans ces tuyaux, la colonne d'air est ébranlée à l'aide de lames élastiques qu'on nomme *anches*, et qui sont de deux espèces, l'*anche battante* et l'*anche libre*.

Anche battante. — Ce petit appareil se compose d'une pièce de bois ou de métal *a* (fig. 411), 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 mince 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. De plus, 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.

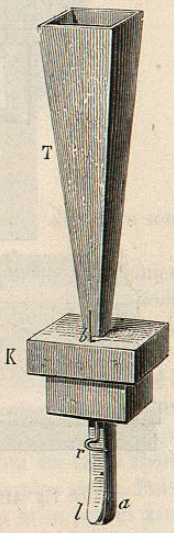

Fig. 411.

L'anche est adaptée au haut d'un tuyau rectangulaire KN, qui est le *porte-vent* (fig. 412). Ce tuyau est fixé sur le sommier 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.

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; puis, la vitesse du courant s'accélérant, la languette vient frapper les bords de la rigole, et, la fermant, empêche le courant de passer. Puis, en vertu de son élasticité, la languette revient sur elle-même, est entraînée de nouveau aussitôt que le courant passe, et ainsi de suite, en sorte que, l'air ne passant que par les 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 vif et les vibrations de la languette plus nombreuses.

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 ri-

gole, entre dans la rigole en rasant ses bords de manière à osciller du dedans au dehors. La rigole consiste ici en une petite caisse de bois *a* (fig. 413), 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 (fig. 412), lorsqu'un courant d'air arrive dans celui-ci, la languette se trouve pressée, se courbe de dehors en dedans, et livre passage à l'air qui s'échappe par le tuyau T, puis elle revient sur elle-même en vertu de son élasticité : il se produit ainsi une suite d'oscillations qui font que la rigole est successivement ouverte et fermée, et que le courant d'air subit une série d'intermittences comme avec les anches battantes.

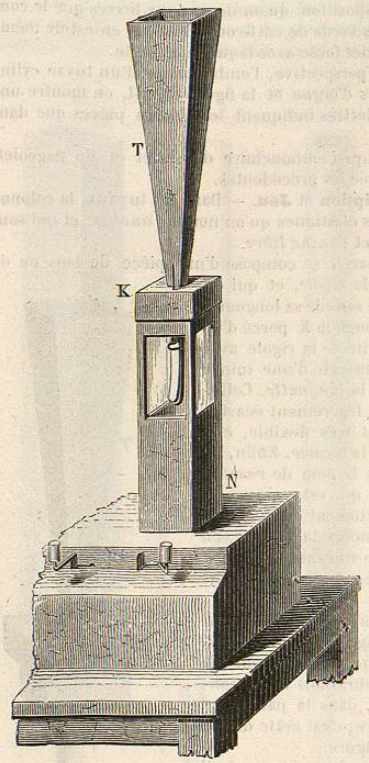

Fig. 412.

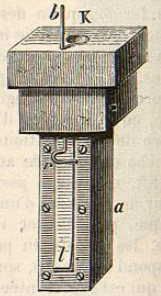

Fig. 413.

380. **Lois expérimentales des tuyaux sonores.** — Les lois qui déterminent les sons rendus par les tuyaux sonores ont été successivement découvertes par le P. Mersenne et par Daniel Bernoulli. Le premier a énoncé la loi des sons rendus par divers tuyaux de dimensions différentes, mais géométriquement semblables; le deuxième a énoncé les lois des sons harmoniques rendus par un même tuyau.

Loi du P. Mersenne (*Loi des tuyaux semblables*). — *Deux tuyaux*

semblables rendent des sons dont les nombres de vibrations sont en raison inverse des dimensions homologues.

Par exemple, si l'on fait parler successivement deux tuyaux semblables (fig. 414) dont les dimensions homologues sont dans

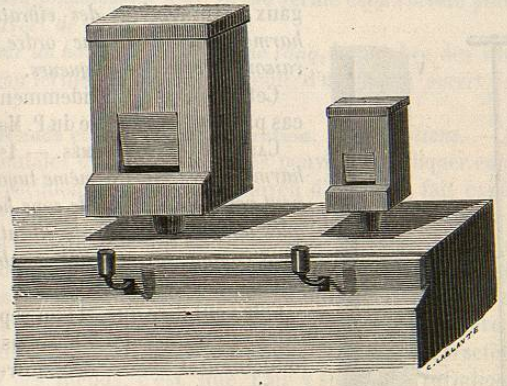

Fig. 414.

le rapport $\frac{1}{2}$, le plus petit rendra un son à l'octave aiguë du son rendu par le plus grand.

Lois de Bernoulli. — Daniel Bernoulli a reconnu le premier le fait suivant : *Un même tuyau peut rendre successivement des sons de plus en plus élevés à mesure qu'on accélère le courant d'air qui le fait parler.*

Pour le démontrer, on fait usage d'un long tube de verre fixé à l'une des embouchures décrites ci-dessus, qu'on a munie d'un robinet afin de régler le courant d'air (fig. 415). 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, on force le vent en ouvrant davantage le robinet et en pesant avec la main sur la tige T de la soufflerie (fig. 397) : on obtient alors des sons de plus en plus élevés, qu'on appelle les *sons harmoniques* ou les *harmoniques* du son fondamental. En opérant ainsi, soit avec des *tuyaux* ouverts par l'extrémité opposée à l'embouchure, soit avec des *tuyaux fermés*, on vérifie les lois suivantes.

Cas des tuyaux ouverts. — 1° *Loi des harmoniques.* — *Un même tuyau ouvert peut rendre une suite de sons harmoniques dont les nombres de vibrations sont entre eux comme la série des nombres naturels.*

Cela veut dire que, 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 la série complète des harmoniques du son fondamental.

2° *Loi des longueurs.* — Pour des tuyaux semblables, mais inégaux, *les nombres des vibrations des harmoniques de même ordre sont en raison inverse des longueurs.*

Cette loi n'est évidemment qu'un cas particulier de celle du P. Mersenne.

Cas des tuyaux fermés. — 1° *Loi des harmoniques. — Un même tuyau fermé peut rendre une suite de sons harmoniques dont les nombres de vibrations varient comme la série des nombres impairs.*

Cela veut dire que, si l'on représente par 1 le nombre des vibrations du son fondamental, ceux des autres sons rendus seront représentés par 3, 5, 7.... C'est uniquement la série des harmoniques d'ordre impair, et quelque effort qu'on fasse, on ne peut tirer du tuyau les autres harmoniques.

2° *Loi des longueurs.* — Il y a une première loi qu'on énonce de la même manière que celle des tuyaux ouverts. Il y en a une deuxième qui permet de comparer les sons rendus par un tuyau fermé et par un tuyau ouvert de même longueur. On peut l'énoncer de la manière suivante : *Le son fondamental rendu par un tuyau fermé est le même que le son fondamental rendu par un tuyau ouvert de longueur double.*

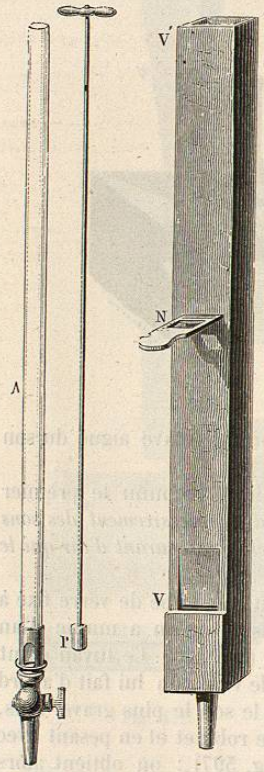

Fig. 415. Fig. 416.

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. 416). 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.

3° *Corollaires.* — On déduit de cette dernière loi les corollaires suivants, qui auraient pu lui servir d'énoncé :

I. *Le son fondamental* d'un tuyau fermé est à *l'octave grave* d'un tuyau ouvert *de même longueur.*

II. *Pour un harmonique de même rang*, le nombre des vibrations d'un tuyau fermé est *moitié* de celui d'un *tuyau ouvert de même longueur.*

381. **Nœuds et ventres de vibration.** — *Définitions.* — Les lois expérimentales des tuyaux sonores peuvent s'expliquer en quelque sorte expérimentalement, au moyen d'un autre fait expérimental : l'existence des *nœuds* et des *ventres de vibration.* L'expérience prouve que, lorsqu'un tuyau *parle*, il existe dans la colonne d'air vibrante, de distance en distance, des tranches fixes qui sont des *nœuds*, et qu'entre deux nœuds consécutifs il se rencontre toujours une section où le mouvement vibratoire de l'air atteint un maximum : c'est un *ventre.* De plus, le caractère *expérimental* des nœuds, c'est que l'air y subit des *variations continuelles* de pression et de densité, tandis que le caractère des ventres, c'est que l'air y vibre constamment *sans changer* de pression ni de densité.

Démonstration expérimentale. — Plusieurs expériences servent à constater l'existence des nœuds et des ventres de vibration dans les tuyaux sonores, ainsi qu'à en déterminer le caractère mécanique.

1° 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. 417). 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° On perce dans les parois d'un tuyau sonore des trous qu'on peut ouvrir ou fermer à volonté à l'aide d'obturateurs mobiles sur deux tourillons (fig. 418) 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 mettant à la pression atmosphérique, prend une densité constante, et que par suite il se forme un ventre là où il y avait un nœud.

3° Si l'on enfonce lentement dans le tuyau A un piston P fixé à une longue tige (fig. 415), 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. Si l'on arrête le piston entre deux nœuds, le son est changé, ce qui prouve que la tranche d'air, maintenant immobile, ne l'était pas primitivement.

4° *Flammes manométriques. — Expériences de Kœnig.* — Sur l'une des parois d'un tuyau rectangulaire est une chambre P, dans laquelle arrive du

Fig. 417.

Fig. 418.

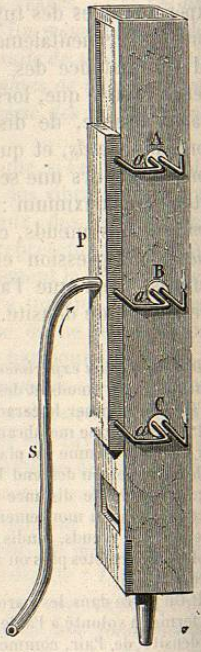

Fig. 419.

gaz d'éclairage par un tuyau de caoutchouc S (fig. 419). De cette chambre partent trois tubes de caoutchouc *a, a, a*, qui conduisent le gaz à autant de capsules fixées dans la paroi antérieure du tuyau, et sur chacune desquelles est appliqué un bec de gaz. 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. 425) 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 ces variations qui font vibrer la membrane de la capsule B et éteignent le bec en le soufflant [1].

Si l'on recommence l'expérience en accélérant le courant d'air, de manière à obtenir le son 2, ce n'est plus le bec B qui s'éteint, mais les deux becs A et C. Cela veut dire qu'en B il y a un ventre, et en A et C des nœuds, comme le montre la figure 424.

Remarque générale. — Dans toutes ces expériences, on constate que, dans un même tuyau, ouvert ou fermé, quel que soit le nombre des nœuds, ils sont toujours également distants entre eux pour un même harmonique rendu et qu'au milieu de la distance de deux nœuds consécutifs il y a toujours un ventre.

382. **Disposition des nœuds et des ventres.** — 1° *Tuyaux fermés* ou *Bourdons.* — Dans ces tuyaux, le fond opposé à l'embouchure est toujours *un nœud*, puisque la couche d'air en contact avec lui est nécessairement immobile et ne peut subir que des variations de densité. A la bouche, au contraire

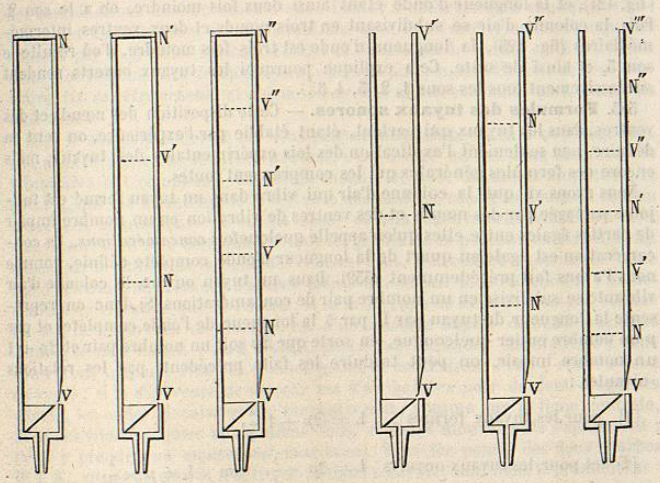

Fig. 420. Fig. 421. Fig. 422. Fig. 423. Fig. 424. Fig. 425.

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 minimum, un nœud N et un ventre V (fig. 420) : c'est alors que le tuyau rend *le son fondamental* et que sa longueur totale est égale *à la demi-onde* (*condensée ou raréfiée*), ou, *au quart de la longueur d'onde complète* (du son fondamental).

Si l'on force le vent, la bouche restant toujours un ventre et le fond un nœud, la colonne d'air se subdivise en trois parties égales VN, NV', V'N' (fig. 421), 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'onde, celle-ci est devenue trois fois plus petite, et par suite le nombre des vibrations trois fois plus grand, puisque le nombre des

1. C'est à cause des variations de pression que ces flammes subissent dans l'appareil de Kœnig, qu'on les appelle *flammes manométriques*.

vibrations est en raison inverse de la longueur d'onde. Donc, si l'on représente par 1 le son fondamental, on a actuellement le son harmonique 3.

Pour le son harmonique qui vient après celui-ci, il y a deux nœuds et deux ventres entre le fond et la bouche (fig. 422), et la distance VN étant alors cinq fois moindre, on a le son 5, et ainsi de suite. Cela explique pourquoi les tuyaux fermés rendent successivement les sons 1, 3, 5, 7.... (380).

2° *Tuyaux ouverts.* — Dans ces tuyaux, les tranches d'air qui se trouvent à la bouche et à l'extrémité opposée, conservant nécessairement une densité constante (celle de l'air atmosphérique), il y a toujours *un ventre* à chaque extrémité et au moins *un nœud* entre les deux ventres extrêmes (fig. 423). Dans ce cas le tuyau rend le *son fondamental*, dont 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 intermédiaire (fig. 424), et la longueur d'onde étant ainsi deux fois moindre, on a le son 2. Puis, la colonne d'air se subdivisant en trois nœuds et deux ventres intermédiaires (fig. 425), la longueur d'onde est trois fois moindre, d'où résulte le son 3, et ainsi de suite. Cela explique pourquoi les tuyaux ouverts rendent successivement tous les sons 1, 2, 3, 4, 5....

383. **Formules des tuyaux sonores.** — Cette disposition des nœuds et des ventres, dans les tuyaux qui parlent, étant établie par l'expérience, on peut en déduire, non seulement l'explication des lois expérimentales des tuyaux, mais encore des formules générales qui les comprennent toutes.

Nous avons vu que la colonne d'air qui vibre dans un tuyau fermé est toujours partagée par des nœuds et des ventres de vibration en un nombre impair de parties égales entre elles qu'on appelle quelquefois *concamérations.* La concamération est égale au quart de la longueur d'onde complète définie, comme nous l'avons fait précédemment (339). Dans un tuyau ouvert, la colonne d'air vibrante se subdivise en un nombre pair de concamérations. Si donc on représente la longueur du tuyau par L, par λ 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 peut traduire les faits précédents par les relations uivantes :

[1] pour les tuyaux fermés $L = (2p+1)\frac{\lambda}{4}$,

[2] et pour les tuyaux ouverts $L = 2p \times \frac{\lambda}{4}$, ou $L = p \times \frac{\lambda}{2}$.

On a vu que la longueur d'onde λ est liée à la durée de la vibration T et à la vitesse du son (dans le gaz qui vibre) par l'équation de définition $\lambda = VT$. En appelant n le nombre de vibrations par seconde qui caractérise le son, on a évidemment

$$n = \frac{1}{T}, \quad \text{d'où} \quad T = \frac{1}{n} \quad \text{et} \quad \lambda = \frac{V}{n}.$$

En remplaçant dans les formules [1] et [2] λ par sa valeur $\frac{V}{n}$, il vient

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

D'où l'on déduit les relations définitives :

[1 *bis*] pour les tuyaux fermés $n = \frac{(2p+1)V}{4L}$,

[2 *bis*] pour les tuyaux ouverts $n = \frac{pV}{2L}$.

Il serait facile de déduire de ces deux formules toutes les lois de Mersenne et de Bernoulli, énoncées précédemment.

Remarque. — Reste à expliquer la production des ventres et des nœuds de vibration. On ne peut le faire rigoureusement qu'en faisant intervenir le *principe des interférences.* C'est de ce principe qu'on peut déduire une théorie complète des tuyaux sonores.

384. **Interférences sonores. — Principe des interférences.** — Reprenons l'expérience simple qui nous a permis de nous faire une idée nette de la propagation du son dans l'air. Supposons que, au lieu de faire tomber une seule pierre en un point d'une nappe d'eau tranquille, nous en fassions tomber deux en deux points peu éloignés. Chacune d'elles donnera naissance à un système d'ondes circulaires, qui se propagera séparément à la surface de l'eau, comme nous l'avons indiqué précédemment; et ces deux systèmes d'ondes, se rencontrant nécessairement sur leur parcours, produiront par cet entrecroisement des combinaisons de mouvements aussi faciles à observer qu'à expliquer. Chaque point de croisement recevra simultanément deux mouvements, l'un qui est apporté par le premier système d'ondes et l'autre par le second système. Si ces deux mouvements sont de même sens, *ils s'ajoutent;* mais s'ils sont de sens contraire, *ils se retranchent*, et même *ils se détruisent mutuellement*, quand ils sont égaux.

Dans le cas particulier où les deux pierres sont tombées, en O et O′ (fig. 426), en même temps et de la même hauteur, c'est-à-dire où les deux mouvements vibratoires ont commencé au même instant et avec la même amplitude, le point I_0, qui est au milieu de la distance des centres, reçoit toujours de chacun d'eux des mouvements de même sens, et son mouvement vibratoire *sera maximum;* il en sera de même de tous les points de la perpendiculaire $H_0 I_0 K_0$, élevée sur le milieu de la ligne des centres. Mais, à droite et à gauche de cette ligne centrale, on trouvera d'autres points qui seront plus éloignés de l'un des centres de vibration que de l'autre : si la différence de ces distances ou, comme on dit, la *différence de marche*, est *d'un nombre impair* de demi-longueurs d'onde, le mouvement y sera détruit, parce que les ondes circulaires s'y rencontreront toujours avec des vitesses égales et contraires : *l'eau y restera donc en repos;* si la *différence de marche* est *d'un nombre pair* de demi-longueurs d'onde, les ondes circulaires s'y rencontreront, comme sur la ligne centrale, avec des vitesses égales et de même sens, et leurs mouvements s'ajouteront : l'eau y prendra *un mouvement maximum.* Tous les points des deux courbes $H_1 I_1 K_1$, situés de part et d'autre de la ligne centrale, sont dans le premier cas : ils restent perpétuellement en repos, au milieu de l'agitation qui les environne; tous les points des deux courbes $H_2 I_2 K_2$ sont perpétuellement en état d'agitation maximum, comme ceux de la ligne centrale $H_0 I_0 K_0$.

Franges. — Ces lignes, et les autres lignes analogues, obtenues par les intersections successives des différentes ondes circulaires, sont appelées des *franges.* Les cercles noirs de la figure 426 représentent les ondes renflées, et les cercles ponctués représentent les ondes déprimées. Partout où deux cercles de même espèce se coupent, il y a maximum de mouvement : le lieu des points où ce maximum a lieu constitue les *franges de mouvement;* elles sont représentées par des lignes ponctuées $H_0 K_0$, $H_2 K_2$.... Partout où deux cercles d'espèce contraire se coupent, il y a destruction de mouvement : le lieu des points où cette destruction a lieu constitue les *franges de repos;* elles sont représentées par des lignes pleines $H_1 K_1$, $H_3 K_3$. On démontre que les unes et les autres sont des *hyperboles* ayant pour foyers communs les deux centres d'ébranlement O et O′ et pour axes la ligne OO′, puis la frange centrale $H_0 K_0$.

Partout où il y a addition de mouvement ou soustraction de mouvement, on dit en général qu'il y a *interférence* de mouvements. Cette expression s'applique plus particulièrement au cas où, par suite de la soustraction des mou-

vements, il y a *destruction complète* du mouvement ou repos absolu, et le *principe des interférences* consiste en cette proposition curieuse, — conséquence directe de l'analyse précédente, — c'est que *du mouvement ajouté à du mouvement produit du repos.*

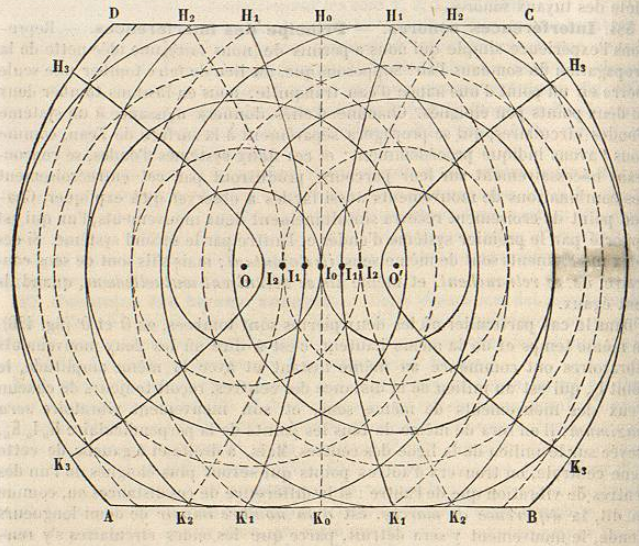

Fig. 426.

385. **Application du principe des interférences aux ondes sonores. — Théorie des tuyaux sonores.** — Si nous passons maintenant du cas des ondes aqueuses circulaires à celui des ondes sonores aériennes, nous verrons les mêmes phénomènes se reproduire dans l'espace, au lieu d'être confinés dans un plan. Deux corps sonores, mis en vibration au même instant, avec la même intensité et avec la même vitesse (c'est-à-dire *à l'unisson*), donnent naissance à deux systèmes d'ondes sphériques, qui se propagent dans l'air de la même manière que les ondes planes précédentes se propageaient à la surface de l'eau. Ces ondes aériennes sont alternativement condensées et dilatées, de telle sorte que, si l'on représente graphiquement l'état vibratoire de l'air à un instant donné, sur un rayon Ox émané de l'un des centres de vibration, on aura la courbe sinueuse *aaaa* de la figure 427, I. Au bout d'un temps $\frac{T}{2}$, égal à la durée d'une vibration simple, l'état vibratoire sur le même rayon sera exactement inverse : il est figuré par la ligne ponctuée *bbbb* de la figure 427, II. Il en sera de même pour les ondes aériennes émanées de l'autre centre de vibration. Ces ondes aériennes *interféreront* nécessairement de la même manière que les ondes aqueuses. Partout où deux ondes condensées ou deux ondes dilatées se rencontreront, il y aura maximum de mouvement : ainsi les mouvements concordants *aaa* (fig. 427, I) et *a'a'a'* (fig. 427, II) donneront le mouvement résultant maximum AAAA (fig. 427, IV). Partout où deux ondes d'espèce

contraire se rencontreront, il y aura, au contraire, destruction de mouvement : ainsi les mouvements discordants *aaa* (fig. 427, I) et *bbb* (fig. 427, II) donneront le mouvement nul, figuré par la droite O_1x_1 (fig. 427, IV) [1]. On pourra donc énoncer cette curieuse proposition, qui constitue l'application du principe des interférences aux ondes sonores, que *du son ajouté à du son produit du silence.*

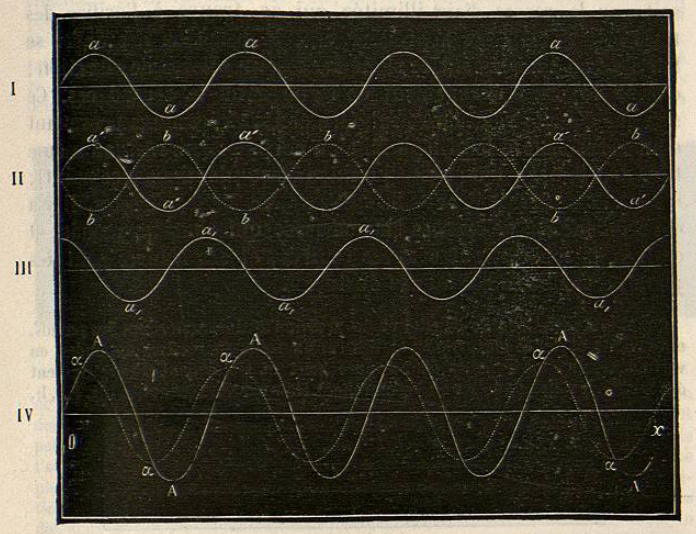

Fig. 427.

Le lieu de l'espace où le mouvement, et par suite le son, est détruit, constitue la *frange silencieuse;* le lieu où le mouvement, et par suite le son, est renforcé, constitue la *frange sonore.* Ici les franges ne sont plus des lignes. La frange centrale est *un plan perpendiculaire* à la ligne des centres sonores, et les franges latérales sont des *hyperboloïdes de révolution*, ayant pour courbes méridiennes des hyperboles analogues à celles qui sont représentées dans la figure 426.

386. **Théorie des tuyaux sonores.** — On a pu vérifier expérimentalement le principe des interférences sonores à l'aide de quelques expériences de cours (Wheatstone, Helmholtz); mais la véritable vérification du principe résulte de l'application qu'on peut en faire à la théorie des tuyaux sonores, et à l'explication de certains phénomènes, tels que les *battements* et les *sons résultants.*

1. La courbe αααα (fig. 427, IV) représente un cas intermédiaire d'interférence : c'est le mouvement résultant de deux mouvements *aaa* et $a_1a_1a_1$, dont la différence de phase n'est pas un nombre exact de demi-longueurs d'onde.

Existence des nœuds et des ventres de vibration. — Deux espèces d'ondes sonores se propagent dans l'intérieur d'un tuyau sonore qui parle : 1° les ondes *directes*, qui proviennent du son produit à l'embouchure du tuyau ; 2° les ondes *réfléchies*, qui proviennent de la réflexion du son, soit sur le fonds solide des tuyaux fermés, soit sur la masse d'air illimitée qui se trouve à l'orifice des tuyaux ouverts. Dans le premier cas, la réflexion des ondes se fait avec un changement de signe dans leur vitesse de vibration ; elle se fait sans changement de signe dans le second cas. Ce système d'ondes réfléchies peut être considéré comme provenant d'un corps sonore fictif identique au corps sonore réel (au même titre que l'image d'un point lumineux est identique à ce point) ; il peut donc *interférer* avec le système des ondes directes. Il y a donc production de franges silencieuses, qui sont les nœuds, et de franges sonores, qui sont les ventres, et ces franges sont des plans perpendiculaires à l'axe du tuyau.

Quant aux variations de densité et de pression qui caractérisent les 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. A l'instant où les ondes marchent les unes vers les autres (fig. 428, I),

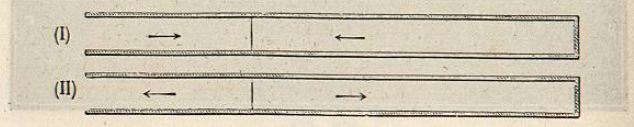

Fig. 428.

il y a condensation ; dans l'instant suivant les ondes s'éloignent (fig. 428, II), et 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.

Formules des tuyaux. — Non seulement le principe des interférences explique l'existence des nœuds et des ventres de vibration, mais il permet d'en déterminer géométriquement la situation dans la longueur du tuyau. Il n'y a qu'à faire intervenir une condition supplémentaire : c'est que la longueur du tuyau doit être telle, que le plan de l'embouchure du tuyau soit, dans tous les cas, un ventre de vibration. C'est ainsi qu'on trouve les formules (383) qui comprennent toutes les lois des tuyaux.

387. **Battements.** — Le principe des interférences s'applique aussi à l'explication du phénomène des *battements*, découvert par le physicien Sauveur.

Quand deux sons, qui diffèrent très peu de hauteur, sont produits simultanément, on perçoit, outre l'impression désagréable qui résulte de leur dissonnance, des *renforcements* et des *affaiblissements périodiques* très nets. C'est surtout aux renforcements, aux coups de force, qu'on donne le nom de *battements ;* mais les affaiblissements sont dus à la même cause, et font partie en quelque sorte du même phénomène.

On a découvert par l'expérience que le nombre de ces battements dépend à la fois de l'intervalle des deux sons et de leur hauteur absolue : *il est égal à la différence des nombres de vibrations* des deux sons. Par exemple, si l'on produit simultanément la note ut_1 (28 vibrations simples) et une note peu inférieure à l'ut_1 ♯ (faisant 133 vibrations), on aura 5 battements par seconde. Si l'on produisait les mêmes notes à l'octave aiguë, on aurait 10 battements.

Les battements sont dus à l'interférence de deux ondes, de périodes peu différentes mais inégales, correspondant à des sons très voisins. Supposons, par exemple, que l'un d'eux effectue 8 vibrations simples tandis que l'autre en effectue 9. L'état vibratoire de l'air, sur le chemin commun aux deux ondes, pourra être représenté par les deux courbes de la figure 429. Il se produit ici un phénomène analogue à celui de la méthode des coïncidences de Borda : seulement le phénomène actuel est sensible à l'ouïe, au lieu d'être sensible à la vue, comme celui des deux pendules. A l'instant où les mouvements des deux ondes sonores sont exactement opposés, leurs effets se détruisent, à peu

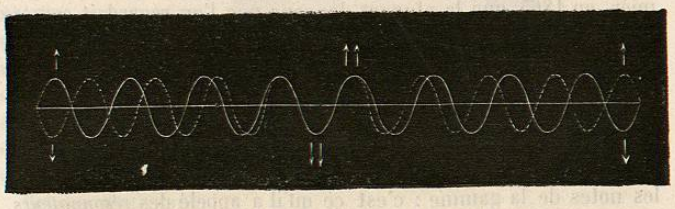

Fig. 429.

de chose près, et il y a un affaiblissement correspondant dans l'intensité totale des deux sons. A partir de cet instant, on voit que les deux ondes se séparent peu à peu ; l'une d'elles, celle qui provient du son le plus élevé, prend de l'avance sur l'autre, jusqu'à ce qu'elle se trouve exactement dans la même phase que celle-ci : ce qui arrive lorsque le son correspondant a fait 4 vibrations et demie tandis que l'autre en a fait 4 : à ce moment, il y a *coïncidence* des deux ondes, les effets s'ajoutent et l'intensité totale des deux sons subit un renforcement : il y a un *battement*. Enfin, à partir de cet instant les ondes se séparent de nouveau de plus en plus, jusqu'à se retrouver chacune dans une phase exactement opposée, ce qui a lieu au bout de 4 1/2 vibrations complètes du son le plus aigu et de 4 vibrations du son le moins aigu.

Ces deux états successifs, d'*opposition* et de *coïncidence* des ondes, sont marqués sur la figure 429 par des couples de flèches, tantôt opposées, tantôt juxtaposées, aux points correspondants.

388. **Sons résultants.** — Un autre phénomène qu'on peut expliquer et prévoir par le principe des interférences, c'est celui des *sons résultants*, signalé pour la première fois par le musicien Tartini.

Lorsqu'on produit simultanément deux sons, de hauteur notablement différente, et *de grande intensité*, on entend un son particulier qui diffère à la fois de chacun des sons primaires et de leurs harmoniques. C'est ce qu'on appelle le *son résultant*.

Tantôt ce son a un nombre de vibrations *égal à la différence* des nombres de vibrations des sons primaires, tantôt il a un nombre de vibrations *égal à leur somme*. Dans le premier cas, le son résultant est dit *différentiel ;* dans le second cas, il est dit *additionnel*. Théoriquement, il est possible d'entendre les deux sons résultants à la fois.

Ainsi deux notes à l'octave l'une de l'autre peuvent produire un son résultant *différentiel* qui est à l'unisson de la note la plus grave ($2 - 1 = 1$) et un son résultant *additionnel* qui est à la quinte de la note la plus aiguë ($2 + 1 = 3$).