VI. Le son parcourt dans l'air, à la température ordinaire, environ 340 mètres par seconde. Sa vitesse dans l'eau est de 1435 mètres. Dans les solides, elle est beaucoup plus grande encore.

VII. Quand les ondes sonores rencontrent un obstacle, elles se réfléchissent en faisant un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence et situé dans un même plan perpendiculaire à la surface réfléchissante. La réflexion du son produit le phénomène de l'écho.

VIII. L'*intensité* du son dépend de l'*amplitude* des vibrations qui le produisent. Elle est inversement proportionnelle au carré de la distance.

IX. La *hauteur* du son dépend du *nombre* des vibrations exécutées dans un temps donné par un corps sonore.

X. La *sirène* est un instrument destiné à compter le nombre des vibrations qui correspondent à tel ou tel son.

XI. Tous les sons, quels que soient leur intensité, leur hauteur ou leur timbre, se propagent avec la même vitesse.

CHAPITRE XXV.

Vibrations des cordes. — Théorie physique de la musique. — Gamme et intervalles musicaux. — Accords; sons harmoniques. — Instruments à vent. Tuyaux sonores.

Vibrations des cordes.

548. *Vibrations des cordes.* — On distingue, dans les cordes, deux sortes de vibrations : les *vibrations transversales* et les *vibrations longitudinales*. Les premières s'exécutent perpendiculairement à la longueur des cordes, et s'obtiennent soit avec un archet, comme sur le violon, soit en pinçant les cordes comme sur la guitare ou sur la harpe, soit par la percussion, comme dans le piano. Les secondes ont lieu dans le sens de la longueur des cordes; on les fait naître en frottant celles-ci longitudinalement avec un morceau de drap saupoudré de colophane.

549. *Vibrations transversales des cordes. Sonomètre.* — Ces vibrations sont les seules importantes à connaître pour la théorie de la musique, dont nous allons nous occuper. Elles sont soumises aux quatre lois suivantes :

1re loi. *Les nombres de vibrations exécutées par une corde dans un temps donné sont en raison inverse de sa longueur.*

Soit n le nombre des vibrations exécutées par une corde d'une longueur quelconque pendant un certain temps : si l'on diminue successivement sa longueur de manière à la réduire à la moitié, au tiers, au quart, au cinquième, etc., le nombre des vibrations sera, dans le même temps, $2n$, $3n$, $4n$, $5n$, *etc.*

2e loi. *Les nombres de vibrations des cordes sont en raison inverse de leur diamètre.*

Par exemple, si l'on prend deux cordes de cuivre ou d'acier également tendues et de même longueur, mais dont l'une ait un diamètre double de l'autre, la plus mince fera, dans le même temps, deux fois plus de vibrations que la plus grosse.

3e loi. *Les nombres de vibrations d'une corde sont proportionnels aux racines carrées des poids qui la tendent.*

Représentons encore par n le nombre des vibrations d'une corde tendue par un poids quelconque : si ce poids est rendu 4, 9, 16 fois plus grand, le nombre des vibrations deviendra, dans le même temps, $2n$, $3n$, $4n$, *etc.*

4e loi. *Les nombres de vibrations des cordes de matières différentes sont en raison inverse des racines carrées de leurs densités.*

Soient deux cordes de même longueur et de même diamètre tendues par le même poids : l'une à boyau, dont nous représenterons la densité par 1, et l'autre en cuivre, dont nous pouvons représenter la densité par 9. Soit n le nombre de vibrations exécutées dans un temps donné par la corde en cuivre; le nombre de vibrations exécutées dans le même temps par la corde à boyau sera $3n$.

Ces quatre lois fondamentales que Lagrange, en 1759, a le premier déterminées par le calcul, peuvent être démontrées expérimentalement au moyen du *sonomètre*. Cet instrument (*fig.* 228) se compose d'une caisse rectangulaire en bois MN de 1 mètre de longueur environ sur 15 centimètres de largeur. Cette caisse, dont les parois sont minces et très-élastiques, a pour but de renforcer le son, comme dans le violon ou la guitare. A ses deux extrémités sont deux chevalets fixes A et B sur lesquels est tendue horizontalement une corde D, fixée par un bout, et dont l'autre extrémité, après s'être réfléchie sur une poulie, supporte un poids P que l'on peut augmenter ou diminuer à volonté. Un troisième chevalet mobile C, pouvant glisser sur une barre divisée *mn*, sert à faire varier la longueur de la corde dont on veut étudier les vibrations, que l'on excite au moyen d'un archet.

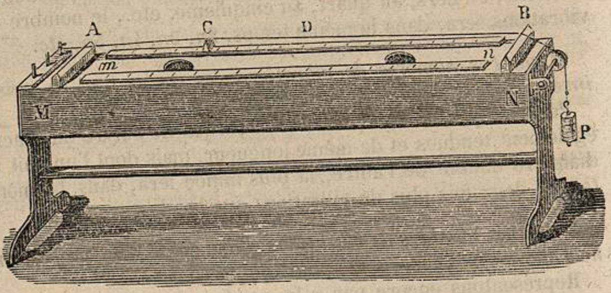

Fig. 228.

550. *Vibrations longitudinales des cordes.* — Les vibrations longitudinales des cordes sont soumises aux mêmes lois que les vibrations transversales; elles sont seulement beaucoup plus rapides et elles produisent, par conséquent, des sons beaucoup plus aigus.

Théorie physique de la musique. Gamme et intervalles musicaux. Accords, sons harmoniques.

551. *Gamme.* — On appelle *gamme* une série de sons ou de notes, au nombre de huit, séparées par des intervalles rigoureusement déterminés. Ces notes se nomment en français *ut, ré, mi, fa, sol, la, si, ut.* En partant du son le plus grave pour s'élever successivement jusqu'au plus aigu, on peut obtenir une suite de gammes qui se reproduisent dans le même ordre et dont l'ensemble forme ce qu'on nomme l'*échelle musicale.*

Pour distinguer entre elles les différentes gammes successives, on est convenu, en physique, de prendre pour point de départ celle dont l'*ut* correspond au son le plus grave du violoncelle (128 vibrations simples par seconde), et de désigner les notes de cette gamme en leur donnant l'indice 1 ; exemple :

ut_1, $ré_1$, mi_1, sol_1, etc. On donne ensuite aux notes des gammes plus élevées les indices 2, 3, 4.... ; exemple : ut_2, $ré_2$...., ut_3, $ré_3$,... etc.; et aux notes des gammes plus graves, les indices —1, —2, —3....; exemple : ut_{-1}, $ré_{-1}$...., ut_{-2}, $ré_{-2}$..., etc. L'ut_{-2} est le son le plus grave que l'on emploie en musique; il correspond à 32 vibrations simples par seconde, et il est donné par le gros bourdon du jeu d'orgues, qui est un tuyau de 16 pieds bouché.

552. *Évaluation numérique des sons.* — Supposons que l'on représente par 1 la longueur d'une corde tendue sur le sonomètre, et que l'on prenne pour l'*ut* de la gamme le son fondamental qu'elle donne. En réduisant successivement la longueur de cette corde au moyen du chevalet mobile, on obtiendra facilement les six autres notes. Or, on trouve que les longueurs de corde qu'il a fallu prendre pour composer la gamme sont dans les rapports suivants :

A	NOTES.	*ut,*	*ré,*	*mi,*	*fa,*	*sol,*	*la,*	*si,*	*ut.*
	LONGUEURS DE CORDE. . . .	1,	$\frac{8}{9}$,	$\frac{4}{5}$,	$\frac{3}{4}$,	$\frac{2}{3}$,	$\frac{3}{5}$,	$\frac{8}{15}$,	$\frac{1}{2}$.

Nous avons vu que les nombres de vibrations des cordes sont en raison inverse de leur longueur. Il suffira, par conséquent, de renverser les fractions précédentes pour avoir les rapports des nombres de vibrations correspondant, dans le même temps, à chaque note de la gamme. Si donc nous représentons encore par 1 le nombre de vibrations qui produit l'*ut*, nous aurons le tableau suivant :

B	NOTES.	*ut.*	*ré,*	*mi,*	*fa,*	*sol,*	*la,*	*si,*	*ut.*
	RAPPORTS DES VIBRATIONS .	1	$\frac{9}{8}$,	$\frac{5}{4}$,	$\frac{4}{3}$,	$\frac{3}{2}$,	$\frac{5}{3}$,	$\frac{15}{8}$,	2

Ceci posé, il est facile de trouver les nombres absolus de vibrations par seconde qui donnent naissance à toutes les notes dont se compose l'échelle musicale. Il suffit pour cela de déterminer, au moyen de la sirène, le nombre de vibrations qui correspond à l'*ut* grave ou fondamental du violoncelle, et de multiplier ce nombre par les rapports inscrits dans le tableau B. La sirène donne, pour l'*ut* grave du violoncelle 128 vibrations simples. On aura donc pour la première gamme :

C	NOTES.	*ut,*	*ré,*	*mi,*	*fa,*	*sol,*	*la,*	*si,*	*ut.*
	NOMBRE DES VIBRATIONS.	128,	144,	160,	170,	192,	214,	240,	256.

Pour déterminer ensuite les nombres de vibrations appartenant à chacune des notes des autres gammes, il suffira de multiplier ou de diviser ces nombres par 2, par 4, par 8..., selon que les gammes à obtenir seront plus hautes ou plus basses que celle-ci.

353. *Intervalles musicaux.*—On désigne en musique sous le nom d'*intervalle* le rapport d'un son à un autre. Ces intervalles portent le nom de *seconde*, de *tierce*, de *quarte*, de *quinte*, de *sixième*, de *septième*, d'*octave*, *etc.*, selon la distance qui sépare les deux sons dans l'échelle musicale. Ainsi l'intervalle de *ut* à *ré* est une *seconde;* de *ut* à *mi*, une *tierce;* de *ut* à *fa*, une *quarte;* de *ut* à *sol*, une *quinte;* de *ut* à *ut*, une *octave*, *etc.*

Si, au lieu de comparer, comme nous l'avons fait dans le tableau B, les nombres de vibrations correspondant à chaque note de la gamme au nombre de vibrations qui correspond à l'*ut*, pris pour unité, on compare chacun de ces nombres à celui de la note précédente (ce que l'on obtient en divisant chaque fraction du tableau B par celle qui la précède immédiatement), on forme le tableau suivant :

D	*ut-ré*,	*ré-mi*,	*mi-fa*,	*fa-sol*,	*sol-la*,	*la-si*,	*si-ut*.
	$\frac{9}{8}$,	$\frac{10}{9}$,	$\frac{16}{15}$,	$\frac{9}{8}$,	$\frac{10}{9}$,	$\frac{9}{8}$,	$\frac{16}{15}$.

On voit, d'après ce tableau, que les intervalles compris entre deux notes consécutives n'ont pas tous la même valeur. On distingue, en effet, trois rapports différents : le plus grand $\frac{9}{8}$ (*ut-ré*, *fa-sol*, *la-si*), s'appelle *ton majeur;* le suivant $\frac{10}{9}$ (*ré-mi*, *sol-la*), est le *ton mineur;* le plus petit $\frac{16}{15}$ (*mi-fa*, *si-ut*), a reçu le nom de *demi-ton*. Toutefois, comme la différence entre le ton majeur et le ton mineur, laquelle porte en musique le nom de *comma*, est trop petite pour être appréciable à l'oreille, on considère, dans la pratique de la musique, les intervalles du ton majeur et du ton mineur comme étant égaux, et on les désigne sous le nom commun de *ton*. Par conséquent, on ne distingue dans la gamme ordinaire que des TONS et des DEMI-TONS, disposés de la manière suivante :

E	*ut-ré*,	*ré-mi*,	*mi-fa*,	*fa-sol*,	*sol-la*,	*la-si*,	*si-ut*.
	ton,	ton,	demi-ton,	ton,	ton,	ton,	demi-ton.

Pour distinguer entre eux les intervalles, tels que ceux de *tierce*, de *quinte*, *etc.*, les musiciens emploient les mots de *majeure* et de *mineure*. Ainsi l'intervalle *ut-mi* qui comprend deux

tons est une *tierce majeure*, tandis que l'intervalle *mi-sol* qui ne comprend qu'un demi-ton et un ton est une *tierce mineure*. En musique, le mot *ton* sert encore à indiquer la hauteur de la gamme dans laquelle on joue.

354. *Dièses et bémols.* — Les huit notes de la gamme ne sont pas les seules employées dans la musique. Entre ces notes sont intercalées d'autres notes intermédiaires que l'on désigne sous les noms de *dièses* et de *bémols*. Leur but principal est de permettre de former une gamme en prenant une note quelconque pour point de départ ou pour *tonique*.

Supposons, en effet, que l'on veuille *transposer* la gamme, c'est-à-dire la commencer par une note quelconque autre que *ut*, tout en lui conservant sa mélodie : la gamme se composant, comme nous venons de le voir, de deux tons successifs, un demi-ton, trois tons successifs et un demi-ton, il faudra, quelle que soit la note prise pour tonique, reproduire exactement cette série pour obtenir une gamme. On réalisera cette condition tantôt au moyen des dièses, tantôt au moyen des bémols, suivant que l'on prendra telle ou telle note pour tonique.

1° *Emploi des dièses.* Soit *ré*, par exemple, la note prise pour tonique. Si nous examinons la série :

ré, mi, fa, sol, la, si, ut, ré,

nous voyons de suite que les intervalles *mi-fa* et *si-ut*, qui doivent remplacer les intervalles *ré-mi* et *la-si* de la gamme d'*ut*, n'étant chacun que d'un demi-ton au lieu d'être d'un ton comme l'exige la série (E), il faut, pour rétablir la mélodie, *hausser* d'un demi-ton la note *fa* et la note *ut*. C'est ce qu'on obtient en *multipliant* par $\frac{25}{24}$ les nombres de vibrations correspondant à chacune d'elles. L'intervalle *mi-fa* et l'intervalle *si-ut*, égaux chacun à $\frac{16}{15}$ (D), seront alors remplacés par $\frac{16}{15} \times \frac{25}{24}$; ou $\frac{10}{9}$, c'est-à-dire par un ton. Les notes qui remplacent le *fa* et l'*ut* prennent les noms de *fa dièse* et de *ut dièse*, et s'indiquent par *fa* ♯ et *ut* ♯.

2° *Emploi des bémols.* Supposons maintenant que l'on veuille reproduire la gamme en partant de la note *fa* : on aura la série

fa, sol, la, si, ut, ré, mi, fa.

Si nous comparons encore cette nouvelle série à la série (E) de la gamme, nous voyons de suite que les intervalles *la-si* et *si-ut* qui remplacent les intervalles *mi-fa* et *fa-sol* de la gamme d'*ut* sont, le premier trop grand et le second trop petit d'un demi-ton. Or, pour donner à chacun d'eux sa valeur voulue, il faudra *baisser* la note *si* d'un demi-ton, c'est-à-dire la remplacer par une nouvelle note dont l'intervalle avec le *la* soit d'un demi-ton et avec l'*ut* d'un ton. C'est ce que l'on obtient en *divisant* par $\frac{25}{24}$, ou, ce qui revient au même, en multipliant par $\frac{24}{25}$ le nombre de vibrations correspondant au *si*. Cette nouvelle note prend alors le nom de *si bémol* et s'indique par *si* ♭.

En résumé, *diéser* ou *bémoliser* une note, c'est l'élever ou la baisser d'un demi-ton, afin de pouvoir reproduire la gamme ordinaire, c'est-à-dire la gamme d'*ut* en commençant par toute autre note.

355. *Gamme tempérée.* — Il résulte de ce qui précède que le dièse d'une note n'est pas rigoureusement égal au bémol de la note suivante. Prenons, par exemple, l'*ut* dièse et le *ré* bémol : si nous représentons par *n* le nombre de vibrations qui correspond à l'*ut*, nous aurons pour l'*ut dièse* $n \times \frac{25}{24}$ ou $\frac{25}{24} n$ vibrations, et pour le *ré bémol* $\frac{9}{8} n \times \frac{24}{25} = \frac{27}{25} n$ vibrations (B).

Le *ré* bémol est donc un peu plus haut que l'*ut* dièse. Toutefois ces deux notes, bien qu'inégales, ne diffèrent que d'un intervalle assez petit pour que l'oreille tolère aisément que l'une soit prise pour l'autre. Avec des instruments tels que le violon, la basse et la guitare, les dièses et les bémols peuvent être obtenus justes; mais pour les instruments à sons fixes, tels que la harpe, le piano et l'orgue, on est convenu, pour ne pas multiplier inutilement le nombre des cordes ou des tuyaux, d'égaliser les dièses et les bémols, de manière que le dièse d'une note et le bémol de la note suivante soient donnés par la même corde ou le même tuyau. La gamme a été alors divisée en douze intervalles ou *demi-tons* égaux entre eux, et dont l'ensemble constitue ce qu'on appelle la *gamme tempérée* :

	ut ♯		*ré* ♯			*fa* ♯		*sol* ♯		*la* ♯		
ut,	ou	, *ré*,	ou	, *mi*,	*fa*,	ou	, *sol*,	ou	, *la*,	ou	, *si*,	*ut*.
	ré ♭		*mi* ♭			*sol* ♭		*la* ♭		*si* ♭		

356. *Accords, sons harmoniques.* — On donne le nom d'*accord* à l'ensemble de plusieurs sons produisant une sensation

agréable à l'oreille. La note la plus grave de l'accord se nomme la *tonique* et la plus aiguë la *dominante*. Il existe un très-grand nombre d'accords, dont les combinaisons variées constituent l'harmonie. Citons entre autres l'*accord parfait majeur : ut, mi, sol*, et l'*accord parfait mineur : la, ut, mi*.

Les *accords parfaits* résultent toujours de sons dont les vibrations sont en rapport simple. Ainsi, dans l'accord parfait *ut, mi, sol*, le plus agréable à oreille, les vibrations sont entre elles comme 4, 5, 6. Cet accord fondamental est fourni par la nature elle-même. En effet, quand on fait vibrer avec l'archet une corde de violoncelle ou de violon, on entend non-seulement le son principal de cette corde, mais on distingue encore sa douzième ou double quinte et sa dix-septième ou triple tierce, c'est-à-dire, en rapprochant les intervalles, un accord parfait majeur. Pour expliquer ce phénomène, on admet que la corde ne vibre pas seulement dans toute sa longueur, mais que certaines de ses parties vibrent séparément et produisent des sons secondaires qui s'harmonisent avec le son principal, et qui, pour cette raison, ont reçu le nom de *sons harmoniques*. Ce fait peut d'ailleurs être démontré directement par l'expérience suivante, due à Sauveur.

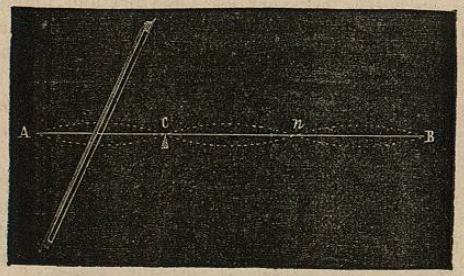

Fig. 229.

357. *Nœuds et ventres de vibration.* — Soit une corde AB (*fig.* 229), tendue sur le sonomètre, et le chevalet mobile C placé sous elle au tiers de sa longueur. Si, au moyen d'un archet, on fait vibrer ce premier tiers AC de la corde, les deux autres tiers C*n*, *nB*, entrent à l'instant d'eux-mêmes en vibration ; mais chacun d'eux vibre isolément autour d'un point *n* qui reste immobile, quoique libre. Ce point s'appelle un *nœud* *de vibration*. Les extrémités A et B de la corde, ainsi que le point C qui repose sur le chevalet, peuvent être également considérés comme des nœuds entre lesquels sont les *ventres de vibrations* AC, C*n*, *n*B. On constate la fixité du point *n* en plaçant sur lui un petit chevron de papier qui reste immobile quand la corde vibre, tandis que si on le place sur l'un des centres de vibration, il est aussitôt lancé au loin.

Si au lieu du tiers de la corde, on en fait vibrer directement le quart, il se forme dans les trois autres quarts deux nœuds de vibrations et trois ventres; si on en fait vibrer le cinquième, on obtient trois nœuds et quatre ventres, etc. D'où il suit que *les nombres de vibrations des sons harmoniques d'une corde qui vibre transversalement varient comme les nombres entiers de la série naturelle* 1, 2, 3, 4, 5.... Nous verrons bientôt (360) que cette loi s'applique également aux sons harmoniques produits par les vibrations de l'air dans les tuyaux sonores dont l'extrémité opposée à leur embouchure est ouverte.

358. *Vibrations longitudinales des verges; plaques.* — Les verges de bois, de verre, et principalement les verges métalliques, peuvent vibrer comme les cordes, et sont également susceptibles d'éprouver deux sortes de vibrations, les unes longitudinales, les autres transversales. Les vibrations longitudinales sont soumises à la loi suivante, que l'on démontre par le calcul : pour des verges de même nature, *les nombres de vibrations sont en raison inverse de leur longueur*. Quant aux vibrations transversales, on trouve aussi par le calcul que *leur nombre est en raison directe de l'épaisseur des verges et en raison inverse du carré de leur longueur*.

Pour les plaques mises en vibration, soit au moyen d'un archet frottant sur leurs bords, soit à l'aide de crins enduits de colophane frottant sur le limbe d'une ouverture centrale, on trouve que *le nombre des vibrations est en raison directe des épaisseurs des plaques et en raison inverse de l'étendue de leurs surfaces*.

En recouvrant de sable les plaques vibrantes, on voit ce sable, aussitôt que les vibrations commencent, se disposer à leurs surfaces en lignes régulières qui représentent les *lignes nodales* ou nœuds de vibrations, dont le nombre et la position varient selon la forme des plaques, leur élasticité, le mode d'ébranlement et le nombre des vibrations.

Instruments à vent. Tuyaux sonores.

359. *Instruments à vent. Tuyaux sonores.* — L'air et tous les autres gaz peuvent, comme les solides et les liquides, entrer d'eux-mêmes en vibration et donner naissance à des sons, ainsi que nous l'avons vu déjà dans la sirène. Les *tuyaux sonores* que l'on emploie dans la composition des jeux d'orgues et de tous les instruments à vent en fournissent une nouvelle preuve. Ces tuyaux sont en général cylindriques ou prismatiques, à parois en métal ou en bois. D'après le mode employé pour mettre en vibration la colonne d'air qu'ils renferment, on les divise en *tuyaux à bouche* et en *tuyaux à anche*.

1° *Tuyaux à bouche*. Le tuyau d'orgue ordinaire représenté par la *fig*. 230 est le type de ce genre de tuyau. Son pied P reçoit le vent d'un soufflet; l'ouverture latérale comprise entre *b* et *b'* est la *bouche*, dont la lèvre supérieure *b* est taillée en biseau et légèrement inclinée en dedans; *l* est une fente très-étroite, nommée la *lumière*, percée dans une plaque métallique transversale, au niveau de la lèvre inférieure *b'*. T est le tuyau qui peut être ouvert ou bouché à sa partie supérieure. Ceci posé, si un courant d'air arrive dans le pied du tuyau, il s'échappe par la lumière et vient se briser en partie contre le biseau de la lèvre supérieure. Cet obstacle que rencontre l'air donne lieu à des intermittences dans sa sortie par la bouche *bb'*, d'où résultent des alternatives régulières de condensation et de dilatation qui se propagent dans l'air du tuyau et le font vibrer. Le son, pour être pur, exige un certain rapport entre la vitesse du courant d'air, la grandeur de la lumière, l'ouverture de la bouche et les dimensions du tuyau. Ce mode d'embouchure appartient également au sifflet, au flageolet, à la flûte de Pan et à la flûte traversière. Dans ces deux derniers instruments, le courant d'air, convenablement dirigé par les lèvres du musicien, vient se briser contre une ouverture circulaire.

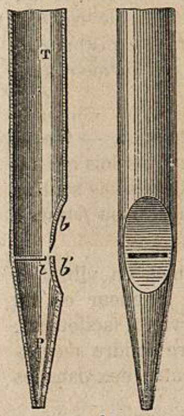

Fig. 230.

2° *Tuyaux à anche*. — Ces tuyaux sont également employés dans les jeux d'orgues. Le système d'ébranlement qui sert à mettre en vibration l'air qu'ils renferment, et que l'on désigne sous le nom d'*anche*, se compose (*fig.* 231) d'un petit tube prismatique *t*, bouché inférieurement, et dont la partie supérieure O est ouverte. L'une des faces latérales de ce tube est formée d'une lame métallique percée d'une ouverture ou fenêtre rectangulaire *r* qu'on appelle la *rigole*. Une *languette* métallique ou lame vibrante *l*, solidement fixée sur la paroi du tube, est appliquée sur la rigole, qu'elle ferme à peu près et dont elle rase les bords lorsqu'elle vibre. Enfin, un fil de métal très-ferme *z*, nommé la *rasette*, presse fortement la languette par son extrémité inférieure, qui est recourbée. Ce fil, qui peut être abaissé ou relevé à volonté, sert à changer la longueur de la partie vibrante de la languette pour en varier les sons. Telle est la disposition générale de l'anche.

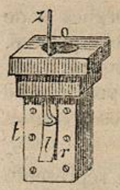

Fig. 231.

Cet appareil, aujourd'hui très-employé, est placé entre deux tuyaux dont l'un lui apporte l'air qui fait vibrer la languette, tandis que l'autre, appelé *tuyau d'échappement*, le conduit au dehors, en donnant au son produit par les vibrations de la languette et de l'air qu'il contient un timbre et une intensité variables selon sa forme et ses dimensions. La clarinette, le hautbois et le basson sont des instruments à anche dont la languette est en bois et dans lesquels la pression des lèvres tient lieu de rasette. Dans le cor, la trompette, le cornet à piston, etc., le son est produit par la vibration des lèvres, qui forment aussi de véritables anches.

360. *Lois des vibrations de l'air dans les tuyaux.* — C'est à Daniel Bernouilli que l'on doit la connaissance des lois qui régissent les vibrations de l'air dans les tuyaux. Ces lois sont un peu différentes, selon que les tuyaux sont *ouverts* ou *fermés* à l'extrémité opposée à leur embouchure.

1° *Lois des tuyaux ouverts.* — Quand on met en vibration l'air que contient un tuyau ouvert dont la longueur est au moins égale à dix fois son diamètre, on parvient facilement, en variant la vitesse du courant d'air, à lui faire rendre successivement plusieurs sons différents qui sont entre eux dans les rapports suivants :

Si l'on représente par 1 le *son fondamental*, c'est-à-dire le plus grave que puisse donner le tuyau, les autres sons seront constamment représentés par *la série naturelle des nombres*

2, 3, 4, 5,...., c'est-à-dire que le second sera à l'octave du premier, le troisième à la quinte de l'octave, le quatrième à la double octave, etc. Ces sons sont appelés *sons harmoniques*, parce qu'ils forment ensemble un accord parfait.

On démontre, par l'expérience et par le calcul, que la longueur de l'onde sonore qui produit le son fondamental est *égale* à celle du tuyau ; que la longueur de l'onde qui produit le son 2 est égale à la moitié du tuyau ; celle du son 3, au tiers ; celle du son 4, au quart, et ainsi de suite.

Une colonne d'air vibrant dans un tuyau peut être assimilée à une corde vibrant transversalement, en ce sens qu'elle se partage, comme celle-ci, en *nœuds* et en *ventres* de vibrations (357). L'expérience montre que pour le son fondamental, correspondant à un tuyau ouvert d'une longueur quelconque, il y a toujours un *nœud* de vibration placé au milieu du tuyau, et deux *ventres*, qui correspondent à ses extrémités ; que pour le son 2 il y a deux nœuds, placés aux deux premiers quarts du tuyau, à partir de ses extrémités, et trois ventres, dont l'un est intermédiaire et correspond, par conséquent, au milieu de la longueur du tuyau ; que pour le son 3 il y a trois nœuds et quatre ventres, dont deux intermédiaires, placés l'un à la fin du premier tiers et l'autre à la fin du second tiers de la longueur, etc.

Lorsqu'on perce des trous dans les parois d'un tuyau sonore au niveau des ventres de vibrations, le son n'éprouve aucune modification ; mais si ces trous sont ouverts en regard des nœuds, ceux-ci se sont à l'instant remplacés par des ventres, et le son se modifie. Les trous que présentent les tuyaux de la flûte, du flageolet, de la clarinette, etc., reposent sur ce principe.

2° *Lois des tuyaux fermés.* — Les tuyaux dont l'extrémité opposée à leur embouchure est fermée peuvent donner, comme les tuyaux ouverts, plusieurs sons différents quand on fait varier la vitesse du courant d'air. Mais ces différents sons, au lieu de suivre la série naturelle des sons harmoniques 1, 2, 3, 4, 5...., correspondent *à la suite des nombres impairs*, 1, 3, 5, 7...., sans qu'il soit jamais possible, de même que dans les tuyaux ouverts, d'obtenir d'autres sons intermédiaires.

Dans les tuyaux fermés, la longueur d'onde qui correspond au son fondamental, ou le plus grave, est *double* de la longueur du tuyau, tandis qu'elle est simplement égale dans les tuyaux ouverts. Par conséquent, si l'on fait parler ensemble deux tuyaux de même longueur, l'un fermé et l'autre ouvert, de manière à faire rendre à chacun le son fondamental, ces deux sons seront toujours à l'octave l'un de l'autre, le plus grave appartenant au tuyau fermé.

Ce fait prouve que dans un tuyau fermé, l'onde sonore se réfléchit sur le fond du tuyau et revient vers l'embouchure; de sorte que l'onde est repliée sur elle-même, ayant ses deux ventres à l'embouchure et son nœud de vibration au fond même du tuyau. Ce nœud représente évidemment celui qui, dans le son fondamental, occupe le milieu de la longueur du tuyau ouvert.

3° *Lois communes aux tuyaux ouverts et aux tuyaux fermés.* — Il résulte de ce qui précède :

1° Que la matière qui compose les tuyaux ouverts ou fermés, bois, verre, métal, etc., *n'a aucune influence sur la hauteur des sons qu'ils produisent :* elle ne change que leur timbre;

2° Que pour des tuyaux ouverts ou fermés de longueurs différentes, les nombres de vibrations correspondant au son fondamental donné par chacun d'eux, sont, comme pour les cordes sonores, *en raison inverse des longueurs de ces tuyaux.*

Par conséquent, pour monter une gamme avec des tuyaux ouverts ou fermés, il suffira de prendre huit tuyaux dont les longueurs soient entre elles comme les nombres inscrits dans le tableau A (352), c'est-à-dire comme $1, \frac{8}{9}, \frac{4}{5}, \frac{3}{4}, \frac{2}{3}, \frac{3}{5}, \frac{8}{15}, \frac{1}{2}$. Ajoutons que les tuyaux fermés donneront, à longueur égale, des sons qui seront à l'octave au-dessous des sons produits par les tuyaux ouverts.

361. *Diapason.* — Pour régler et accorder ensemble les divers instruments de musique, il faut prendre pour point de départ une note invariable que l'on puisse toujours reproduire à volonté. Cette note est donnée par un petit instrument nommé *diapason*. Il se compose (*fig.* 232) d'une tige d'acier recourbée vers son milieu en deux branches, dont les extrémités libres convergent l'une vers l'autre. Une petite tige de fer que termine une espèce de petit timbre en cuivre lui sert de pied. On fait vibrer cet instrument en écartant brusquement ses deux branches au moyen d'un cylindre de fer que l'on passe de force entre elles. Tous les diapasons doivent rendre le même son. Ce son est un la_3, correspondant à 870 vibrations simples par seconde.

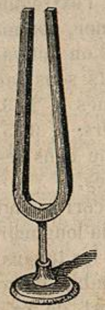

Fig. 232.

Résumé.

I. On distingue dans les cordes sonores deux sortes de vibrations : les *vibrations transversales* et les *vibrations longitudinales.*

II. Les lois qui régissent les *vibrations transversales* des cordes sont au nombre de quatre :

1° Les nombres de vibrations exécutées par une corde, dans un temps donné, sont en raison inverse de sa longueur;

2° Les nombres de vibrations d'une corde sont proportionnels aux racines carrées des poids qui la tendent;

3° Les nombres de vibrations des cordes sont en raison inverse de leur diamètre;

4° Les nombres de vibrations des cordes sont en raison inverse des racines carrées de leurs densités.

Ces lois se démontrent par le calcul et par l'expérience, au moyen du sonomètre.

III. On appelle *gamme* une série de sons ou de notes, au nombre de huit, séparées par des intervalles rigoureusement déterminés dont le dernier est à l'octave du premier. Ces notes sont : *ut, ré, mi, fa, sol, la, si, ut.*

IV. Les notes de la gamme peuvent être représentées soit par les rapports de longueur des cordes qui les produisent, soit par les rapports des nombres de vibrations qui leur correspondent.

V. On désigne en musique sous le nom d'*intervalle* le rapport d'un son à un autre; ces intervalles portent les noms de *seconde, tierce, quarte, quinte, octave, etc.*

VI. Les *dièses* et les *bémols* sont des notes intermédiaires que les musiciens intercalent entre les notes de la gamme. *Diéser* une note, c'est augmenter le nombre des vibrations dans le rapport de 24 à 25; la *bémoliser*, c'est diminuer ce même nombre dans le rapport de 25 à 24.

VII. On donne le nom d'*accord* à l'ensemble de plusieurs sons qui produisent une sensation agréable à l'oreille : tels sont l'*accord parfait majeur, ut, mi, sol;* et l'*accord parfait mineur, la, ut, mi.* Toute corde qui vibre fait entendre un accord parfait majeur.

VIII. Les *vibrations longitudinales* des cordes sont soumises aux mêmes lois que les vibrations transversales; mais les sons qu'elles produisent sont beaucoup plus aigus.

IX. Les tuyaux sonores que l'on emploie dens les jeux d'orgues et dans tous les autres instruments à vent se divisent, d'après le mode employé pour mettre en vibration l'air qu'ils renferment, en tuyaux ou en instruments *à bouche* et en tuyaux ou en instruments *à anche*. Ces tuyaux peuvent être ouverts ou fermés.

X. Lorsqu'on fait varier la vitesse du courant d'air à l'aide duquel on fait parler un tuyau *ouvert*, ce tuyau peut rendre successivement différents sons qui suivent la série naturelle des nombres 1, 2, 3, 4, 5...... Si le tuyau est *fermé*, les sons produits suivent la série impaire 1, 3, 5, 7....

XI. Le son fondamental, ou le plus grave que donne un tuyau fermé, est toujours à l'octave *au-dessous* du son fondamental produit par un tuyau ouvert de même longueur et de même diamètre.

XII. Le diapason est un instrument qui donne une note invariable (la_3), d'après laquelle on accorde tous les autres instruments de musique.

CHAPITRE XXVI.

OPTIQUE.

Propagation de la lumière dans un milieu homogène. — Ombre. Pénombre. — Vitesse de la lumière. — Mesure des intensités relatives de deux lumières. — Lois de la réflexion. — Miroirs plans. — Miroirs sphériques concaves et convexes.

Propagation de la lumière dans un milieu homogène.

362. *Optique.* — On donne le nom d'*optique* à la partie de la physique qui traite de la *lumière.*

363. *Hypothèses sur la nature de la lumière.* — La lumière est l'agent qui produit en nous le phénomène de la vision. Deux hypothèses ont été imaginées pour expliquer son origine : l'hypothèse de l'*émission* et celle des *ondulations*.

La première appartient à Newton ; elle admet que les corps lumineux lancent continuellement dans l'espace, avec une vitesse prodigieuse, une substance impondérable qui traverse les corps transparents et est arrêtée par les corps opaques. Cette

substance, arrivant au fond de notre œil, excite en nous une sensation particulière, en vertu de laquelle nous apercevons les corps lumineux qui l'envoient.

Dans la seconde hypothèse, imaginée par Descartes, on attribue la lumière à des vibrations très-rapides exécutées par les corps lumineux, vibrations qui se transmettraient jusqu'à l'organe de la vue, par l'intermédiaire d'un milieu élastique sous la forme d'ondulations analogues à celles qui transmettent le son. Ce milieu ne peut être l'air atmosphérique, puisque nous apercevons les astres à travers les espaces célestes. On le considère comme un fluide particulier, éminemment subtil, répandu partout, et que l'on désigne sous le nom d'*éther* (123). Ainsi, d'après cette hypothèse, la lumière prend naissance et se propage dans l'éther, comme le son prend naissance et se propage dans l'air et dans tous les autres corps élastiques. *L'hypothèse des ondulations* est admise aujourd'hui par la plupart des physiciens.

364. *Rayon et pinceau de lumière.* — On appelle *rayon lumineux* la ligne que suit la lumière en se propageant. La réunion de plusieurs rayons lumineux émanés d'une même source se nomme un *pinceau* ou un *faisceau* de lumière. Un pinceau ou un faisceau de lumière est dit *parallèle* lorsque les rayons qui le composent sont parallèles ; il est dit *divergent* ou *convergent*, selon que ses rayons vont en s'écartant ou en se rapprochant les uns des autres.

365. *Propagation de la lumière dans un milieu homogène.* — La propagation de la lumière dans un milieu homogène est soumise aux lois suivantes :

1re loi. — *Dans un milieu homogène, la lumière se propage en ligne droite.*

Il suffit, pour s'en assurer, d'interposer un corps opaque sur la droite menée de l'œil à un corps lumineux : celui-ci cesse à l'instant même d'être aperçu. Lorsqu'un pinceau de lumière pénètre dans une chambre obscure par une ouverture étroite, on voit encore une trace lumineuse parfaitement rectiligne éclairant la poussière et tous les corpuscules qui flottent dans l'air.

2e loi. — *L'intensité de la lumière varie en raison inverse du carré de la distance.*

Soit (*fig.* 233) un point lumineux L placé au sommet d'un cône droit *dLc*, coupé par un plan *ob* perpendiculaire à son axe