

C'est donc bien au timbre qu'il faut rattacher les différences qui nous permettent de reconnaître à distance une personne qui parle et dont nous entendons la voix ; c'est aussi au timbre qu'il faut rattacher, dans le chant, les différences qui tiennent aux divers modes d'émission de la voix et qui sont quelquefois désignées sous le nom de *voix* ou de *registre* ; voix de tête, voix de fausset, voix de poitrine.

Mais, et c'est là la partie la plus importante de la question, c'est aussi au timbre, d'après la définition même, qu'il faut rattacher les différences qui sont caractérisées par la production de ce que l'on appelle les *voyelles* ; ici la question devient précise, car il s'agit de différences qui sont constamment appréciées par chacun de nous.

Nous n'avons pas à étudier en détail les voyelles, mais nous devons faire remarquer simplement qu'il ne faut pas comprendre ce mot dans le sens où on l'emploie en grammaire où on admet l'existence de 5 voyelles : le nombre en est plus grand et doit être pris au moins égal à 8, savoir *a, e* (eu), *é, è, i, o, u, ou* (qui est un son simple, malgré la forme littérale de diphtongue), sans compter les diverses variétés de l'*a*, sinon peut-être de quelques autres voyelles.

725. **Harmoniques.** — Lorsqu'on écoute attentivement un son, de manière à analyser la sensation qu'on éprouve, il est quelquefois possible d'y distinguer plusieurs notes simultanées, comme une sorte d'accord, tandis que dans d'autres cas, on n'entend absolument qu'une note. Dans le cas où l'on entend plusieurs sons, le plus grave a une intensité dominante et c'est lui qui, pour l'oreille, caractérise la hauteur du son.

Le fait de l'existence de sons accessoires qui accompagnent, avec une faible intensité, le son fondamental a été observé par Rameau (1722). Lorsqu'on les entend, on peut déterminer leur hauteur à l'aide de la sensation même : on a reconnu que, dans les sons musicaux, les sons les plus aisément perceptibles sont consonnants avec le son fondamental, qu'ils forment avec lui un accord parfait. Pour cette raison, on les a appelés les *harmoniques* du son fondamental.

L'importance de ces sons accessoires n'a pu être appréciée à sa juste valeur que lorsque, par les moyens que nous indiquerons, on a pu reconnaître facilement l'existence des sons accessoires et les déterminer. Nous dirons alors quel rôle on leur attribue actuellement dans la différenciation des timbres.

726. **Son, bruit.** — Il est difficile, au point de vue de la sensation seule, de dire quelle différence existe entre un *son* et un *bruit*. Il y a surtout, sinon uniquement, une différence de timbre : les bruits présentent, en effet, des variations d'intensité, trop évidentes pour qu'il soit nécessaire d'insister : ils présentent également des différences de hauteur. Il est facile de s'en assurer en comparant des bruits de même nature, obtenus dans des conditions diverses ; par exemple les bruits obtenus en

débouchant des bouteilles de capacité différente. On peut répéter cette expérience à l'aide de cylindres (fig. 368) munis de pistons qu'on retire vivement ; la rentrée brusque de l'air amène un ébranlement de l'air qui entraîne la production d'un son

ou plutôt d'un bruit ; par un choix convenable des dimensions des cylindres, on peut obtenir des bruits produisant les notes de la gamme, de l'accord parfait. De même, en projetant sur un plan résistant des baguettes de bois de même section et de longueurs déterminées ; de même aussi, en frappant sur des lamelles de bois suspendues en deux points : il y a même des instruments de musique, tels que le xylophone, basés sur cette remarque.

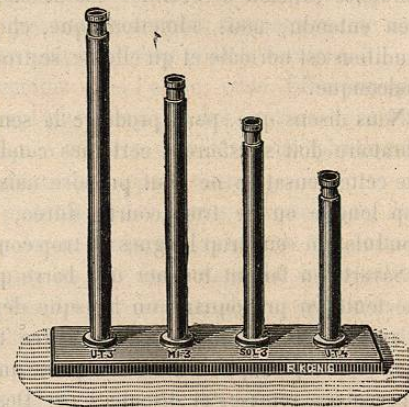


Fig. 368.

Ce ne peut être dès lors que par le timbre que les bruits diffèrent entre eux, comme ils diffèrent des sons : nous aurons à revenir ultérieurement sur cette question.

CHAPITRE III

LES QUALITÉS DU SON ET LES VIBRATIONS

727. Cause mécanique du son. Limites des sons perceptibles.

— Ayant étudié séparément les mouvements vibratoires des corps, d'une part, et, d'autre part, les sensations auditives au point de vue de leurs qualités, nous pouvons rechercher quelles relations existent entre les uns et les autres.

Nous allons montrer qu'il existe entre les mouvements vibratoires et les sensations auditives normales, physiologiques, la relation directe de cause à effet, et que, de plus, les qualités du son dépendent des éléments caractéristiques des mouvements vibratoires.

La sensation auditive, le son, reconnaît pour cause objective un mouvement vibratoire communiqué à l'oreille.

Pour le prouver, il suffit que l'observateur place à côté de lui un quelconque des appareils propres à déceler l'existence d'un mouvement vibratoire. Si cet appareil est assez sensible, on trouve que toutes les

fois que la sensation auditive est éprouvée, il indique l'existence d'un mouvement vibratoire; réciproquement lorsqu'un mouvement vibratoire est mis en évidence par l'appareil, au moins tant que ce mouvement vibratoire satisfait à certaines conditions, l'observateur entend un son. Bien entendu, nous admettons que, chez cet observateur, l'acuité de l'audition est normale et qu'elle ne se trouve pas affaiblie par une cause quelconque.

Nous disons que, pour produire la sensation auditive, le mouvement vibratoire doit satisfaire à certaines conditions : l'expérience a montré que cette sensation ne peut prendre naissance si les vibrations sont de trop longue ou de trop courte durée, c'est-à-dire si les longueurs d'ondulation sont trop longues ou trop courtes.

Savart, en faisant tourner une barre qui à chaque tour passait dans une fente en provoquant un brusque déplacement de l'air, a reconnu qu'aucun son n'était perçu si la barre tournait trop lentement, tandis qu'il y avait perception d'un son pour une rotation plus rapide. De ces expériences, reprises et discutées par Despretz, ce savant a conclu que, en moyenne, aucun son n'est perçu si le nombre des vibrations simples n'est pas au moins de 32 par seconde¹. La longueur d'ondulation correspondante est d'environ 20^m,5.

D'autre part, Despretz et Marloye opérant sur des diapasons, lames vibrantes, ont reconnu que le son n'est plus perçu lorsque le nombre des vibrations dépasse 73 000 par seconde; encore cette limite ne peut-elle être atteinte que pour des oreilles très sensibles. La longueur d'ondulation est alors de 0^m,0047.

Ainsi l'organe de l'audition, qui produit la sensation auditive sous l'influence d'un mouvement vibratoire, ne nous fait cependant éprouver cette sensation que lorsque les longueurs d'ondulation qui lui sont communiquées sont comprises entre certaines limites, que lorsque les nombres de vibrations par seconde ne sont ni trop grands ni trop petits. Au delà et en deçà de ces limites, le mouvement vibratoire doit bien encore être transmis mécaniquement à l'oreille, mais il ne met pas en jeu l'activité spéciale de cette oreille, il n'y a pas production d'un son.

Il est très intéressant de rapprocher cette remarque du fait analogue que nous avons signalé pour l'œil qui ne peut non plus produire la sen-

1. Dans le mouvement oscillatoire d'un corps, la vibration complète correspond au temps qui s'écoule entre le passage du corps vibrant en un point et son retour à ce même point, *dans le même sens*; par exemple au temps qui s'écoule depuis le moment où le corps est à une position extrême jusqu'à l'instant où il y revient. La durée de la vibration simple est la moitié de la précédente : elle correspond au temps que met le mobile à aller de l'une à l'autre de ses positions extrêmes.

Dans toutes les indications ultérieures, il s'agira exclusivement des vibrations simples, à moins d'avis contraire.

sation spéciale de la lumière si les vibrations qui lui sont communiquées sont trop lentes ou trop rapides.

Il faut d'autre part signaler les différences numériques qui existent dans les deux cas, différences qui sont extrêmement grandes, ainsi qu'on le voit en comparant les valeurs que nous venons de donner pour le son à celles que nous avons indiquées précédemment pour la lumière.

Bien entendu, dans un cas comme dans l'autre, cette différence qui dépend du mode de fonctionnement physiologique des organes de la vue et de l'ouïe ne peut être expliquée par des considérations physiques. Ajoutons que la raison n'en est même pas encore connue.

728. **Intensité.** — Étudions maintenant les causes auxquelles on doit attribuer les qualités des sons; la méthode générale sera toujours la même : observer des sons différents les uns des autres par une qualité, d'une part, et, d'autre part, étudier à l'aide d'appareils enregistreurs ou autres les différences que présentent les mouvements vibratoires qui ont donné naissance à ces sons.

L'expérience faite, dans ces conditions, sur des sons de même hauteur et de même timbre montre que l'intensité est en relation directe avec l'amplitude du mouvement vibratoire communiqué à l'oreille et évaluée à l'aide d'un appareil enregistreur placé à côté de l'observateur.

La variation d'amplitude d'un mouvement vibratoire produit une variation de la vitesse moyenne puisque les oscillations ont lieu dans le même temps, puisqu'elles sont isochrones, la vitesse moyenne est d'autant plus grande que l'amplitude, le chemin parcouru est plus considérable. Comme il paraît probable que nous sommes impressionnés, non par chaque vibration prise isolément, mais par l'action fusionnée, pour ainsi dire, d'un certain nombre de vibrations, il serait possible que ce fût cette vitesse moyenne, et non l'amplitude elle-même, à laquelle est liée l'intensité. Nous verrons plus loin pourquoi on peut être porté à admettre qu'il en est bien ainsi.

729. — L'observation, l'expérience montrent que l'intensité du son, de la sensation auditive, ne dépend pas seulement de l'amplitude de la vibration, mais qu'un autre élément intervient. En produisant le même mouvement vibratoire avec la même amplitude dans l'air à des pressions différentes, on reconnaît que l'intensité varie avec la pression, croissant et décroissant en même temps qu'elle.

C'est ainsi que Saussure d'abord, puis d'autres observateurs, ont reconnu que le bruit d'un coup de pistolet, que la parole, donnent naissance à des sons de faible intensité au sommet des montagnes où la pression de l'air est moindre qu'en plaine. D'autre part, Rœbuch a signalé l'intensité considérable du son produit dans des galeries où se trouvait de l'air comprimé servant à l'alimentation de hauts fourneaux dans le Devonshire; Hauksbée rapporte également l'observation d'un son

de très grande intensité produit à l'aide d'un cornet dans une cloche à plongeur où la pression de l'air était également supérieure à la pression normale de l'atmosphère.

Rapprochons du premier fait le résultat indiqué par Priestley qui, après avoir respiré de l'hydrogène, remarqua que sa voix était grêle, faible. Dans ce cas, l'air expiré des poumons contenait une certaine proportion d'hydrogène, ce qui avait pour effet de diminuer son poids spécifique.

Quelle conclusion tirer de ces faits ?

Remarquons que, pour un individu, le volume de l'air qui agit directement sur l'oreille par l'intermédiaire du tympan, volume qui est celui du canal auditif, est constant. Mais la *masse* du gaz compris dans ce volume dépend de son poids spécifique et varie proportionnellement : cette masse active sera moindre dans un air raréfié, dans un air mélangé d'hydrogène que dans le cas de l'air à la pression normale, elle sera plus grande dans l'air comprimé.

Nous pouvons donc dire que, toutes choses égales d'ailleurs, l'intensité varie avec la masse du gaz qui communique le mouvement à l'oreille.

Nous avons vu (XLVI) que la force vive d'un corps mesure l'énergie qu'il possède, mesure en mécanique la grandeur de l'action qu'il peut produire; nous avons dit que la même notion paraît applicable au point de vue des phénomènes calorifiques et au point de vue des effets produits par les radiations. Il est donc assez naturel, *a priori*, de penser qu'il peut en être de même pour la sensation acoustique et d'admettre que l'intensité du son doit être proportionnelle à la force vive communiquée à l'oreille en un temps donné.

S'il en est ainsi, l'intensité doit varier avec la masse du corps qui agit sur l'oreille, et avec la vitesse moyenne des parties en mouvement, puisque la force vive est mv^2 .

Mais ces résultats sont concordants avec ceux que nous avons indiqués : nous voyons alors que l'amplitude de la vibration n'est qu'un des éléments desquels dépend l'intensité d'un son et nous pouvons dire plus généralement :

L'intensité d'un son est due à la force vive mv^2 communiquée à l'oreille en un temps donné par le corps (un gaz en général) avec lequel cet organe est en contact.

On déduit bien de cet énoncé général les résultats suivants conformes aux faits observés :

Pour un même gaz, à la même pression, l'intensité du son varie avec la vitesse moyenne et par conséquent avec l'amplitude du mouvement vibratoire.

Pour une même amplitude du mouvement vibratoire, l'intensité du son varie avec la masse du gaz, avec son poids spécifique, par conséquent.

Il est évident que, théoriquement au moins, d'après ces données, on pourrait construire un étalon d'intensité du son, un appareil permettant de faire varier dans un rapport déterminé la quantité de force vive communiquée à l'oreille et par conséquent à faire varier l'intensité du son dans le même rapport. Il n'a pas été construit d'appareils spéciaux sous cette forme; mais nous retrouverons ultérieurement l'application de la même idée sous une forme différente.

730. **Hauteur.** — La hauteur du son est liée à la rapidité des vibrations, à leur durée; on le vérifie toujours de la même façon en produisant des sons différents dont on détermine directement la hauteur par l'impression perçue et en enregistrant en même temps le mouvement vibratoire à l'aide d'un appareil mécanique.

Il va sans dire que, au lieu de déterminer la rapidité du mouvement vibratoire par la durée θ de l'oscillation, on pourrait indiquer la longueur d'ondulation correspondante λ ; mais le plus souvent, on cherche le nombre n de vibrations effectuées dans un temps donné; comme nous l'avons dit, en France au moins, on emploie toujours les vibrations simples.

Au lieu d'opérer en enregistrant les vibrations produites par un appareil quelconque, on peut déterminer le nombre de vibrations en produisant ces vibrations à côté de l'observateur à l'aide d'un appareil qui les compte directement; c'est une autre méthode générale qui a été fréquemment employée.

La roue dentée de Savart peut être utilisée dans ce but : c'est une roue présentant à sa périphérie des dents régulièrement espacées que l'on fait tourner aussi uniformément que possible et dont un compteur enregistre le nombre de tours. Pendant que la roue tourne, on appuie contre les dents un corps flexible comme une carte un peu résistante : au passage de chaque dent il se produit un choc et, par suite, une vibration est communiquée à l'air et transmise à l'oreille. Pour déterminer le nombre de vibrations correspondant à un son donné, on fait varier la vitesse de la roue jusqu'à ce que le son considéré ait été obtenu et on maintient la vitesse constante à partir de cet instant. On met alors le compteur en marche et on prolonge l'expérience pendant 10 secondes par exemple. Si le compteur a fait t tours pendant ce temps et que la roue présente m dents, il y a eu en totalité mt vibrations produites et le nombre n de vibrations par seconde est $n = \frac{mt}{10}$. Dans ce cas, il s'agit évidemment de vibrations complètes : il faut donc doubler ce nombre si l'on veut donner l'évaluation en vibrations simples.

731. — La sirène de Cagniard-Latour permet d'arriver au même résultat par un autre procédé.

Considérons un disque, percé d'ouvertures régulièrement espacées sur une circonférence, tournant autour d'un axe passant par son centre per-

pendiculairement à son plan, et soit un tuyau amenant un courant d'air sous pression et dont l'extrémité vient presque en contact avec le disque, en face des ouvertures. L'ouverture de ce tuyau sera bouchée et l'air ne sortira pas tant que cette ouverture sera en face d'une partie pleine du disque; l'écoulement aura lieu, au contraire, lorsqu'une ouverture du disque se trouvera en face de l'extrémité du tuyau. La rotation du disque aura donc pour effet d'amener dans l'air du tuyau et dans l'air situé de l'autre côté du disque des variations périodiques de condensation et de dilatation, dont le nombre, pour un tour du plateau, sera égal à celui des ouvertures qui y ont été pratiquées. Si donc le disque continue sa rotation d'une manière régulière, on aura déterminé des vibrations de l'air périodiques et isochrones, et l'on entendra un son dont la hauteur dépend de la vitesse de rotation.

Sous cette forme, l'appareil est connu sous le nom de *sirène* de Seebeck et peut servir à faire un certain nombre d'expériences. Mais dans la sirène de Cagniard-Latour, outre que l'appareil porte un compteur de tours, le mouvement de rotation est donné par l'action même du courant d'air. Voici comment l'appareil est disposé :

A l'extrémité d'un tuyau qui amène le vent d'une soufflerie, se trouve une caisse cylindrique (fig. 369) dont la base supérieure est un disque circulaire percé d'un certain nombre de trous. Ces trous, disposés sur une circonférence, sont régulièrement espacés et présentent une inclinaison notable sur le disque; comme le montrent les coupes faites, l'une passant par l'axe et l'autre tangentielle à la circonférence des centres des trous, les axes de ces trous sont inclinés, non dans la direction du rayon, mais dans celle des tangentes.

Un axe vertical, ayant son pied au centre de ce disque et dont la partie supérieure est maintenue par une garniture métallique, porte, presque au contact du disque fixe, un autre disque pouvant tourner avec l'axe. Ce disque présente une série de trous disposés comme ceux du disque fixe, si ce n'est qu'ils sont inclinés en sens contraire.

Enfin, ajoutons que, à la partie supérieure, l'axe porte une vis sans fin qui peut engrener avec une roue dentée qui fait marcher un compteur à l'aide duquel on détermine le nombre de tours effectués par le disque mobile. Un système d'embrayage mobile à l'aide d'un bouton met en prise l'axe et le compteur, ou supprime la communication, à volonté.

On conçoit aisément que lorsque la soufflerie fonctionne, l'air arrivant sous pression s'échappe à travers les ouvertures et, à cause des inclinaisons opposées des trous, produit la rotation du disque mobile. L'action étant continue, le mouvement s'accélère peu à peu jusqu'à ce que les résistances et les frottements qui croissent avec la vitesse venant à s'équilibrer, le mouvement devient uniforme.

Le passage de l'air à travers les ouvertures produit des condensations

et dilatations comme dans le disque de Seebeck; quoiqu'il y ait plusieurs trous au disque inférieur, le nombre de vibrations pour un tour est égal au nombre des trous du disque mobile: toutes les ouvertures étant bouchées ensemble ou débouchées en même temps, le courant d'air subit le même nombre de condensations ou de dilatations, que si l'air ne s'échap-

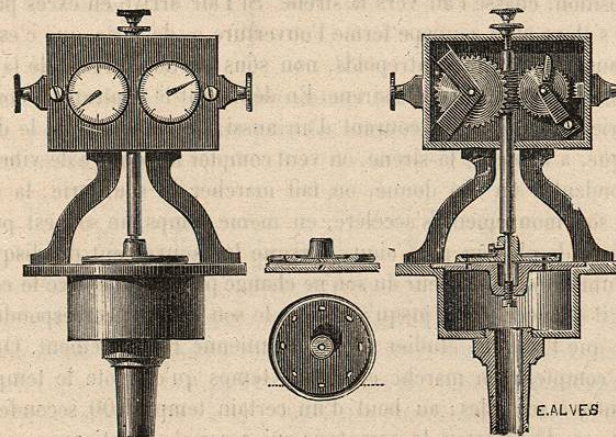


Fig. 369.

paît à chaque instant que par une seule ouverture; seulement l'intensité est plus grande.

Lors donc que sous l'influence d'une pression constante, le disque ayant pris un mouvement uniforme, il y aura production d'un son déterminé, le nombre de vibrations par seconde s'obtiendra en multipliant le nombre de tours effectués dans le même temps par le nombre de trous du disque.

732. — Pour faire varier la hauteur du son, il faut modifier la pression de l'air qui parvient à la sirène, puis la maintenir constante une fois que l'on a obtenu le son que l'on veut étudier. On arrive à ce double résultat en faisant traverser à l'air qui arrive de la soufflerie un régulateur de pression, par exemple le régulateur de Cavallé-Coll. Cet appareil consiste en une caisse de bois de petites dimensions séparée par une cloison *c* (fig. 370) en deux parties distinctes *A* et *B* qui communiquent l'une avec le tuyau porte-vent en *l*, l'autre avec la sirène par l'ajutage *s*.

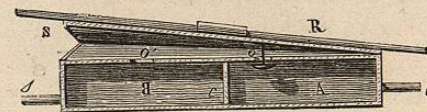


Fig. 370.

La paroi supérieure est percée de deux ouvertures *o* et *o'* situées de part et d'autre de la cloison *c* et forme l'une des parois rigides d'un soufflet par l'intermédiaire duquel communiquent les deux parties *A* et *B*. La seconde paroi rigide de ce soufflet porte une règle *R S* sur laquelle peut glisser un contrepoids

dont l'effet est d'autant plus grand qu'il est plus loin de la charnière : enfin une soupape qui est reliée à la paroi mobile ferme l'ouverture lorsque le soufflet est plein.

On conçoit alors le jeu de l'appareil : l'air, arrivant par l , remplit d'abord le soufflet qui, sous l'influence du poids qui a été fixé à une certaine position, chasse l'air vers la sirène. Si l'air arrive en excès par l le soufflet s'élève et la soupape ferme l'ouverture o , de sorte que c'est toujours sous l'action du contrepoids, non sous l'action directe de la soufflerie, que l'air est envoyé à la sirène. En déplaçant le contrepoids, on peut faire varier l'intensité du courant d'air aussi lentement qu'on le désire.

Lorsque, à l'aide de la sirène, on veut compter le nombre de vibrations correspondant à un son donné, on fait marcher la soufflerie; la sirène tourne, son mouvement s'accélère, en même temps un son est produit qui devient de plus en plus aigu. Lorsque le mouvement du disque est devenu uniforme, la hauteur du son ne change plus. On déplace le contrepoids, s'il est nécessaire, jusqu'à ce que le son produit corresponde à la hauteur que l'on veut étudier et s'y maintienne régulièrement. On met alors le compteur en marche en même temps qu'on note le temps sur une montre à secondes; au bout d'un certain temps, 100 secondes par exemple, on désembraye le compteur qui cesse de fonctionner quoique le disque continue à tourner. Il ne reste plus qu'à lire le nombre t de tours effectués; s'il y a m trous au disque, le nombre total des vibrations sera égal à mt et le nombre n par seconde sera $n = \frac{mt}{100}$: il s'agit ici de vibrations complètes.

733. **Intervalles. Gamme.** — A l'aide de l'un quelconque des procédés que nous avons indiqués, on a pu chercher quelles relations existent entre les nombres de vibrations et les données qui caractérisent musicalement un son déterminé.

La question la plus importante est celle qui se rattache à la connaissance des intervalles. Soient quatre sons A, B, et C, D qui ont été choisis tels que l'intervalle A-B soit, à l'aide de l'oreille, jugé être le même que l'intervalle C-D. Si l'on mesure les nombres de vibrations correspondants a , b , c et d , on trouve que l'on a

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{d}$$

Il en est de même pour tout autre couple de sons dont l'intervalle est jugé le même que celui de A à B. Ainsi, quels que soient deux sons, si leur intervalle est le même, le rapport des nombres de vibrations correspondants est constant; ce rapport caractérise donc l'intervalle considéré.

On a pu déterminer expérimentalement la valeur de ces rapports pour les intervalles usités en musique et l'on a trouvé les nombres suivants :

Seconde	$\frac{9}{8}$	Sixte	$\frac{5}{3}$
Tierce	$\frac{5}{4}$	Septième	$\frac{15}{8}$
Quarte	$\frac{4}{3}$	Octave	2
Quinte	$\frac{3}{2}$		

C'est-à-dire que si nous représentons par n le nombre de vibrations de l'*ut*, par exemple, on aura pour les nombres de vibrations des diverses notes de la gamme :

ut_1	$ré_1$	mi_1	fa_1	la_1	sol_1	si_1	ut_2
n	$\frac{9}{8}n$	$\frac{5}{4}n$	$\frac{4}{3}n$	$\frac{3}{2}n$	$\frac{5}{3}n$	$\frac{15}{8}n$	$2n$

Il est alors facile, sans nouvelles expériences, de déterminer la valeur numérique qui correspond à l'intervalle de deux notes quelconques, puisqu'il suffit de prendre le rapport des nombres de vibrations correspondants. Ainsi l'intervalle de fa_1 à ut_2 , ces notes correspondant respectivement à $\frac{4}{3}n$ et $2n$ vibrations, est caractérisé par le rapport $2n : \frac{4}{3}n = \frac{3}{2}$; l'intervalle fa_1-ut_2 est donc une quinte.

En opérant ainsi sur les intervalles qui existent entre chaque note de la gamme et la suivante, on trouve successivement :

$ut_1-ré_1$	$\frac{9}{8}$	sol_1-la_1	$\frac{10}{9}$
$ré_1-mi_1$	$\frac{10}{9}$	la_1-si_1	$\frac{9}{8}$
mi_1-fa_1	$\frac{16}{15}$	si_1-ut_2	$\frac{16}{15}$
fa_1-sol_1	$\frac{9}{8}$		

734. — Ainsi avec les valeurs de la gamme telle qu'elle a été adoptée, il n'est pas vrai absolument, comme nous l'avons dit (721), qu'il y ait dans la gamme des intervalles de deux natures différentes : il y en a, en réalité, de trois espèces : $\frac{9}{8}$, $\frac{10}{9}$, $\frac{16}{15}$. De ces intervalles, deux sont assez voisins : ils correspondent à $\frac{9}{8}$ et à $\frac{10}{9}$, c'est le *ton majeur* et le *ton mineur*; l'autre est manifestement plus petit.

Ainsi partant de l'*ut* correspondant à n vibrations le *ré*, à un intervalle d'un ton majeur, correspond à $\frac{9}{8}n$ vibrations, et il y aurait une