

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

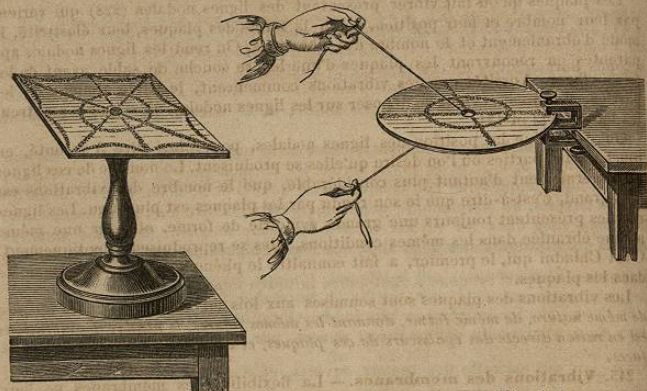


Fig. 173.

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

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



Fig. 175.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

* CHAPITRE VI.

MÉTHODES GRAPHIQUES POUR L'ÉTUDE DES MOUVEMENTS VIBRATOIRES.

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

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

et imprime à un faisceau lumineux un mouvement vibratoire semblable à celui dont il est animé lui-même.

M. Lissajous opère avec des diapasons, et pour rendre visible le mouvement de ces appareils, il fixe à l'une des branches un petit miroir *m* (fig. 176), puis à l'autre branche un contre-poids *n*, ce qui est nécessaire pour que le diapason vibre longtemps et régulièrement. A quelques mètres du miroir est une lampe entourée d'une cheminée opaque dans laquelle est percé un petit trou qui donne un simple point lumineux. Cela posé, le diapason étant d'abord au repos,

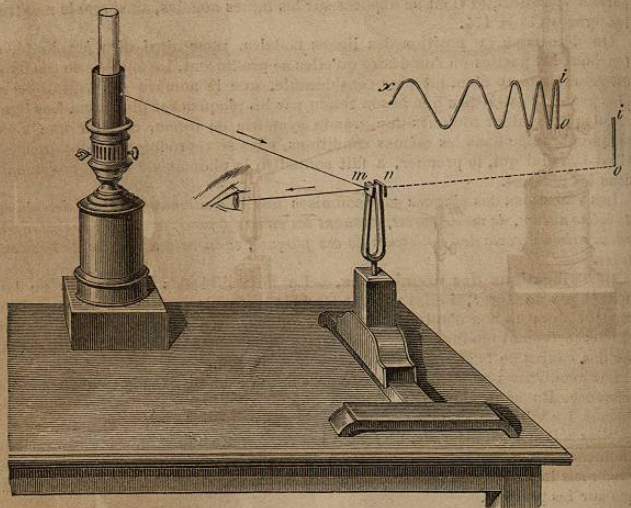


Fig. 176.

on place l'œil de façon à voir l'image du point lumineux en *o*. Puis, faisant vibrer le diapason, on voit aussitôt l'image s'allonger dans le sens de la longueur des branches et donner une image persistante *oi*, qui diminue de grandeur en même temps que l'amplitude des oscillations décroît. Si au mouvement oscillatoire que possède le miroir on ajoute un mouvement de rotation en faisant tourner le diapason autour de son axe, alors, au lieu d'une image rectiligne *oi*, on a une image sinuëuse *oiz*. Ces différents effets s'expliquent par les déplacements successifs qu'impriment au pinceau lumineux réfléchi les vibrations du miroir, et par la durée, dans l'œil, de la sensation lumineuse après que la cause en a cessé, phénomène sur lequel nous reviendrons en traitant de la vision.

Si au lieu de voir directement les effets qui viennent d'être décrits, on veut les rendre visibles par projection sur un écran, on dispose l'expérience comme le montre la figure 177. Le pinceau réfléchi sur le miroir vibrant vient se réfléchir une seconde fois sur un miroir fixe *m*, qui le renvoie vers une lentille achromatique *l*, placée de façon à former nettement sur un écran les mêmes images qu'on aperçoit directement dans l'expérience de la figure 176.

217. Composition optique de deux mouvements vibratoires de même direction. — Après être parvenu à rendre visibles les vibrations de corps sonores en donnant un vif éclat à l'un des points du corps vibrant, M. Lissajous a encore

résolu le problème de la composition optique de deux mouvements vibratoires de même direction d'abord, puis ensuite de directions rectangulaires; et c'est ici que l'habile physicien arrive à faire avec l'œil les études acoustiques les plus complètes et les plus savantes.

Pour composer deux mouvements vibratoires parallèles, l'expérience est disposée comme on le voit dans la figure 178. Deux diapasons, armés de miroirs, étant disposés en regard l'un de l'autre, la lumière réfléchie sur l'un des miroirs

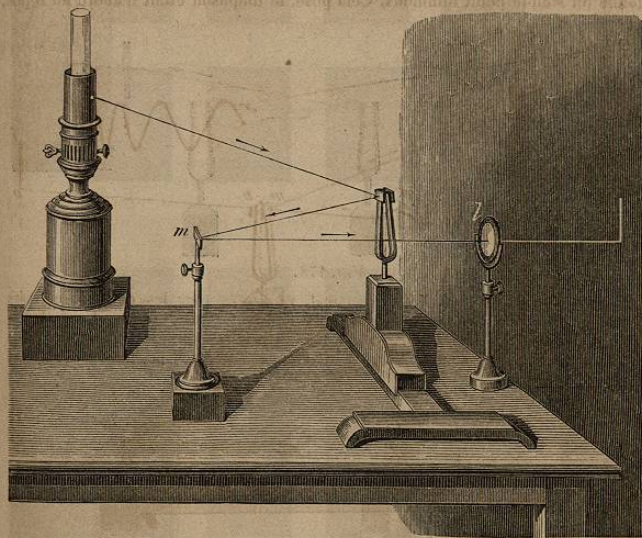


Fig. 177.

revient sur l'autre, qui est sensiblement parallèle au premier, et de là est renvoyée vers un écran, après avoir traversé une lentille convergente.

Cela posé, si l'on ne fait vibrer d'abord que le premier diapason, l'image s'allonge, comme on l'a déjà vu dans l'expérience de la figure 177; mais si on les fait vibrer tous les deux, en les supposant parfaitement à l'unisson, l'allongement augmente ou diminue, suivant qu'il y a concordance ou discordance entre les mouvements simultanés imprimés à l'image par les vibrations des miroirs.

Si les deux diapasons passent en même temps et dans le même sens par leur forme d'équilibre, l'image atteint son maximum de grandeur. Au contraire, s'ils y passent en même temps, mais en sens contraire, il y a minimum. Entre ces deux limites, l'amplitude de l'image varie avec le temps plus ou moins long qui s'écoule entre les moments précis où les deux diapasons passent par leur forme d'équilibre. Le rapport entre ce temps et la durée d'une vibration double a été désigné par M. Lissajous sous la dénomination de *différence de phase*.

Lorsque les diapasons sont rigoureusement d'accord, la trace lumineuse portée sur l'écran n'éprouve qu'un décroissement progressif de longueur, à mesure que l'amplitude des vibrations diminue; mais si l'accord est tant soit peu altéré, la grandeur de l'image varie périodiquement, et tandis que l'oreille entend les bat-

tements (215) qui résultent du défaut d'accord, l'œil voit nettement les pulsations concomitantes de l'image.

248. **Composition optique de deux mouvements vibratoires rectangulaires.** — La composition optique de deux mouvements vibratoires rectangulaires s'opère comme on le voit dans la figure 179, c'est-à-dire à l'aide de deux

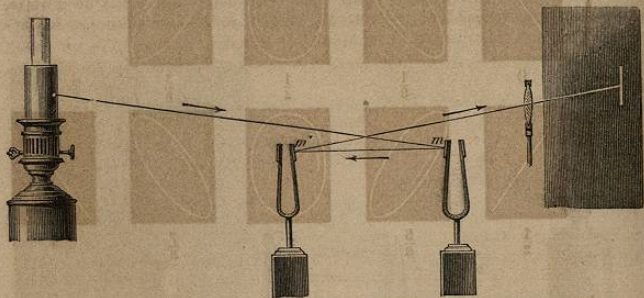


Fig. 178.

diapasons, l'un horizontal, l'autre vertical, et armés tous les deux de miroirs comme dans les expériences précédentes. Si l'on ne fait vibrer d'abord que le diapason horizontal, on voit se former sur l'écran une trace lumineuse horizontale; si c'est le second diapason qui vibre seul, l'image est verticale. Mais si l'on fait

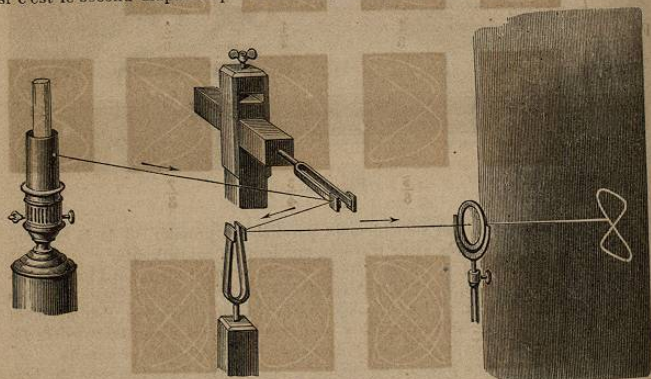
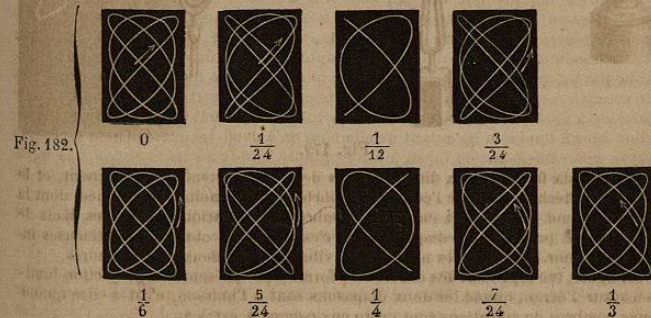
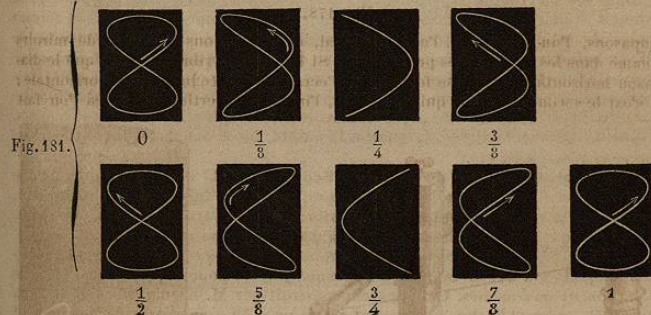
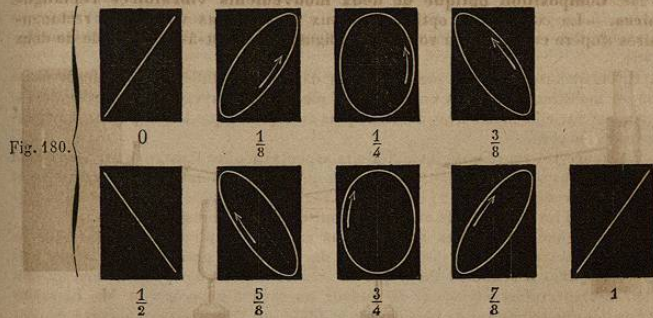


Fig. 179.

résonner à la fois les deux diapasons, les deux mouvements se combinent, et le faisceau réfléchi décrit sur l'écran une courbe plus ou moins compliquée, dont la forme dépend du rapport entre les nombres de vibrations exécutées dans le même temps par les deux diapasons; et c'est ici qu'on obtient de précieuses indications pour comparer les nombres de vibrations de deux corps sonores.

La figure 180 reproduit les différentes formes que présente la projection lumineuse sur l'écran, quand les deux diapasons sont à l'unisson, c'est-à-dire quand leurs nombres de vibrations sont entre eux comme 1 est à 1.



Les fractions placées au-dessous de chaque courbe indiquent les différences de phases correspondant à chacune d'elles. C'est la différence de phase qui détermine la forme initiale de la courbe; mais celle-ci conserve exactement la même forme lorsque les diapasons sont d'accord, à la condition, toutefois, que les amplitudes des deux vibrations rectangulaires décroissent dans le même rapport.

Si les diapasons ne sont pas tout à fait d'accord, la différence initiale de phase ne se maintient pas, et la courbe passe par toutes ses variétés; elle semble se balancer sur elle-même avec d'autant plus de rapidité que les diapasons sont plus loin de l'accord.

La figure 181 représente les différents aspects qu'offre l'image lumineuse quand les diapasons sont à l'octave, c'est-à-dire quand leurs nombres de vibrations sont entre eux comme 1 est à 2; et la figure 182 donne la série de courbes qu'on obtient quand les nombres de vibrations sont entre eux comme 3 est à 4.

On voit que les courbes sont de plus en plus compliquées à mesure que les deux termes du rapport des nombres de vibrations prennent une valeur plus élevée. Quant à l'examen théorique de ces courbes et des phénomènes qu'elles représentent, nous renvoyons le lecteur au savant mémoire de M. Lissajous (*Annales de physique et de chimie*, année 1857), où l'on trouvera le tracé géométrique des courbes de vibrations et le calcul de leur équation générale.

Dans les différentes expériences décrites ci-dessus, nous avons supposé qu'on prenait simplement pour source de lumière une lampe ordinaire; en faisant usage de la lumière électrique, par exemple de l'appareil photo-électrique de M. Duboscq, ces phénomènes prennent un éclat remarquable, et c'est certes une des belles expériences de physique que ce concours prêté par la lumière aux phénomènes de l'acoustique, pour dessiner en traits de feu des courbes qui caractérisent si bien les vibrations transversales, longitudinales ou tournantes, l'accord, l'octave, la tierce, la quarte, la quinte, les dissonances, les battements, les sons résultants, etc.

249. **Phonautographe de M. Léon Scott.**—Dans la méthode graphique due à M. Duhamel (211), c'est le corps sonore qui trace lui-même ses vibrations; mais cette méthode ne peut donner les vibrations des tuyaux sonores, du chant, d'un bruit quelconque, par exemple celui du tonnerre ou du canon.

M. Léon Scott a heureusement généralisé la méthode graphique dans l'appareil auquel il a donné le nom de *phonautographe*, pour exprimer que les sons s'impriment eux-mêmes. Cet appareil, construit par M. Kœnig, se compose d'un ellipsoïde creux AB (fig. 183), ayant à peu près 50 centimètres de longueur et 30 dans son plus grand diamètre. Destiné à conduire et à concentrer les ondes sonores, il importe que cet ellipsoïde soit construit en une substance peu vibrante, sinon il amortirait beaucoup le son; c'est pourquoi M. Kœnig le construit en plâtre. L'extrémité A est ouverte, mais l'autre extrémité est fermée par un fond solide, au centre duquel est adapté un tuyau de cuivre *a*, coudé et terminé par un anneau, sur lequel est fixée une membrane flexible de boudruche ou de caoutchouc très-mince. Un second anneau, qui se serre plus ou moins sur le premier à l'aide de vis, sert à tendre à volonté la membrane, qui, du reste, ne vibre bien à l'unisson qu'autant qu'elle n'est qu'à demi-tendue. On peut tourner le tuyau *a* sur lui-même de façon à faire prendre toutes les inclinaisons à la membrane. Sur cette dernière, près du centre, est fixé avec de la cire à cacheter un style *o* extrêmement léger, participant à tous les mouvements de la membrane. Afin que ce style ne se trouve pas correspondre à un nœud de vibration, M. Scott adapte, sur l'anneau tenseur de la membrane, une pièce mobile *z*, qu'il en nomme le *subdiviseur*, et qui, en la touchant en tel ou tel point, à la volonté de l'opérateur, modifie la position des nœuds, de manière que le style corresponde à un ventre, et, par suite, vibre avec la membrane. On voit qu'ainsi construit, le phonautographe présente une grande analogie avec l'organe de l'ouïe, l'ellipsoïde

correspondant au canal auditif, la membrane au tympan, et le subdiviseur aux osselets de l'oreille interne.

Cela posé, toutes les fois qu'un son est produit dans le voisinage de l'appareil, l'air contenu dans l'ellipsoïde, la membrane et le style vibrant à l'unisson, il reste à tracer sur une surface sensible les vibrations du style et à les fixer. Pour cela, en avant de la membrane, on place un cylindre de cuivre C, tournant autour d'un axe horizontal au moyen d'une manivelle *m*; de plus, pendant sa rotation, le cylindre avance dans le sens de son axe, celui-ci étant muni d'un

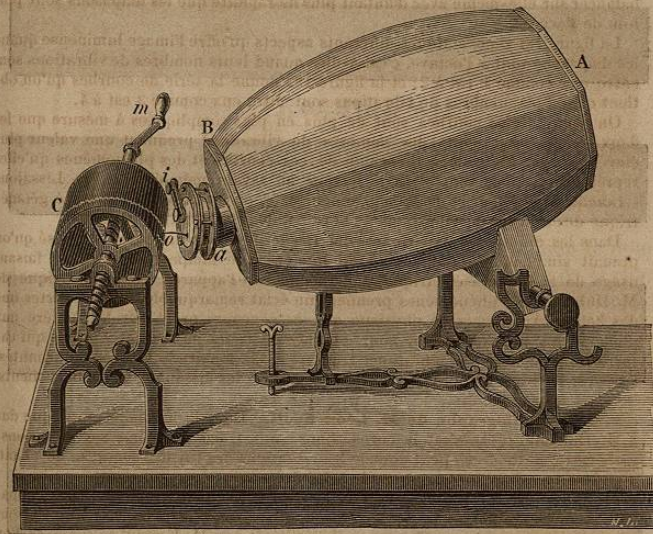


Fig. 183.

pas de vis qui tourne dans un écrou. La surface du cylindre est recouverte d'une feuille de papier, sur laquelle on fait déposer une légère couche de noir de fumée, en promenant dessous, pendant qu'elle tourne, une lampe dans laquelle brûle un liquide fuligineux.

L'appareil ainsi disposé, on met la surface préparée au noir de fumée en contact avec le style, puis on donne au cylindre un mouvement de rotation plus ou moins rapide. Tant qu'aucun son ne se fait entendre, le style reste en repos, et ne fait, par son frottement, qu'enlever le noir de fumée et mettre le papier à nu en traçant une hélice régulière; mais aussitôt qu'un son quelconque est produit, la membrane et le style vibrant à l'unisson, le trait tracé sur la feuille de papier n'est plus rectiligne, mais ondulé, chacune de ses ondulations correspondant à une vibration double du style; en sorte que les figures ainsi obtenues marquent fidèlement le nombre, l'amplitude et l'isochronisme des vibrations. Ces figures sont amples quand le son est intense, microscopiques s'il est très-faible, écartées quand il est grave, serrées s'il est aigu, d'un dessin régulier et franc si le timbre est pur, inégales et comme tremblées s'il est mauvais ou voilé. Toutefois ces courbes ne donnent pas le tracé simple des vibrations de la membrane, mais le mouve-

ment résultant de celui de la membrane et de celui que prend le style dans le sens latéral.

La figure 184 montre le tracé d'un ton simple chanté, renforcé par son octave supérieure, représentée par la courbe de moindre amplitude.

La figure 185 donne le son de deux tuyaux sonores à l'octave.

La figure 186, dans sa ligne inférieure, représente le roulement de la lettre R grassyée; et la figure 187, aussi dans sa ligne inférieure, correspond au bruit que fait entendre une plaque de fer-blanc qu'on frappe avec le doigt.



Fig. 184.

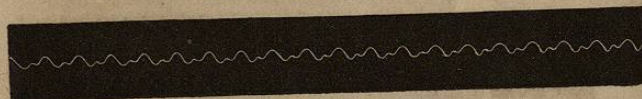


Fig. 185.



Fig. 186.

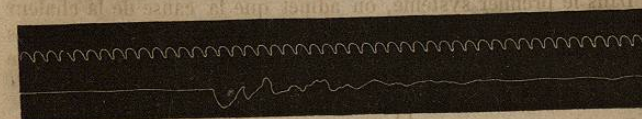


Fig. 187.

Quant aux lignes supérieures des figures 186 et 187, elles sont identiques toutes les deux, et représentent les vibrations parfaitement isochrones tracées par un diapason placé près de l'ellipsoïde. Ce diapason, dont une des branches porte un style très-léger, fait 500 vibrations doubles par seconde; en sorte que chaque ondulation de la ligne sinuieuse supérieure correspond à $\frac{1}{500}$ de seconde. D'où l'on voit que la courbe sinuieuse tracée par le diapason devient un chronomètre mesurant avec une grande précision des intervalles de temps extrêmement petits, de même que dans l'appareil de Duhamel (211). Par exemple, dans la figure 186, chacun des chocs isolés produisant le roulement de la lettre R grassyée correspond à 18 vibrations doubles du diapason, et a, par conséquent, une durée de $\frac{18}{500}$ de seconde, ou environ $\frac{1}{28}$.

Les différentes courbes une fois tracées, il reste à les fixer sur le papier au noir de fumée. Pour cela, M. Scott trempe ses épreuves d'abord dans un bain d'alcool pur; puis, quand elles sont séchées, dans un second bain d'alcool tenant en dissolution une résine, de la sandaraque, par exemple. Le noir de fumée est alors parfaitement fixé.

LIVRE VI

DU CALORIQUE.

CHAPITRE PREMIER.

NOTIONS PRÉLIMINAIRES; THERMOMÈTRES.

250. **Calorique, hypothèses sur sa nature.** — On donne le nom de *calorique* à l'agent qui fait naître en nous la sensation de la chaleur. Mais cet agent exerce aussi une action sur les corps inertes; c'est lui qui fait fondre la glace, bouillir l'eau, rougir le fer.

De nombreuses opinions ont été émises sur la cause de la chaleur. Deux seulement règnent encore dans la science : le *système de l'émission*, et celui des *ondulations*.

Dans le premier système, on admet que la cause de la chaleur est un fluide matériel, impondérable, qui peut passer d'un corps à un autre, et dont les molécules sont dans un état continu de répulsion. Ce fluide existerait dans tous les corps, accumulé autour des molécules et s'opposant à leur contact immédiat.

Dans le système des ondulations, on admet que la chaleur est due à un mouvement vibratoire des molécules des corps chauds, lequel mouvement se transmet aux molécules des autres corps par l'intermédiaire d'un fluide éminemment subtil et élastique, qu'on nomme *ether*, et dans lequel il se propage à la manière des ondes sonores dans l'air. Les corps les plus chauds sont alors ceux dont les vibrations ont une plus grande amplitude et une plus grande rapidité, et l'intensité de la chaleur ne serait autre chose que la résultante des vibrations des molécules. Dans la première hypothèse, les molécules des corps qui se refroidissent perdent du calorique; dans la seconde, elles ne perdent que du mouvement.

Depuis les progrès de la physique moderne, la théorie des ondulations paraît seule admissible. Toutefois, comme celle de l'émission se prête mieux aux démonstrations, on la préfère, en général, pour l'explication des phénomènes de la chaleur.