

LIVRE IV

ACOUSTIQUE

691. — Nous avons étudié, dans les livres précédents, des questions qui se rapportent à des phénomènes dont certains de nos sens peuvent nous donner connaissance; le sens musculaire (sensation de l'effort) pour les phénomènes relatifs à la dynamique en général et à la pesanteur en particulier; le sens calorifique (qui, uni au précédent, constitue le sens complexe du toucher) pour les phénomènes de même nom, par la sensation de chaleur; le sens de la vue, pour les phénomènes optiques, par la sensation de lumière.

De même, le sens de l'ouïe nous procure des sensations spéciales dites *sensations sonores* ou *auditives*, et nous allons étudier les phénomènes physiques qui se rapportent à la production de ces sensations.

Cette étude doit se faire dans des conditions toutes différentes de celles que nous venons de rappeler, parce que, tandis que, pour ces dernières, la cause des phénomènes est inconnue et qu'il faut se contenter d'hypothèses pour les expliquer, il n'existe aucun doute sur la cause des phénomènes acoustiques qui se rattachent à la mise en activité de l'organe de l'ouïe.

En effet, si, laissant à part les sensations qui prennent naissance dans certains états pathologiques, on se borne à l'examen des sensations qui se manifestent dans l'état physiologique, on sait d'une manière certaine que ces sensations sont dues à la transmission à l'oreille d'un mouvement vibratoire par l'intermédiaire d'un milieu matériel, solide, liquide ou gazeux. L'origine objective de la sensation est donc parfaitement déterminée.

L'étude des phénomènes acoustiques comprend dès lors deux parties entièrement différentes : l'étude des mouvements vibratoires des corps élastiques, et celle des relations qui existent entre les conditions de ces mouvements et les modifications de la sensation. La première est du domaine propre de la mécanique et a pu être traitée par le calcul, en partant des propriétés générales des corps élastiques; la seconde, seule,

serait du domaine de la physique. Mais, d'autre part, pour vérifier les conséquences de la théorie mécanique, on a eu souvent recours aux sensations sonores, de telle sorte que les deux parties de la question sont plus intimement liées qu'il ne pourrait paraître nécessaire.

Sans insister, nous indiquerons d'abord comment, expérimentalement, on peut étudier les conditions d'un mouvement vibratoire, celles de sa production, celles de sa propagation, sans avoir recours à la sensation sonore.

CHAPITRE PREMIER

ÉTUDE DIRECTE DES MOUVEMENTS VIBRATOIRES

692. **Vibrations des corps élastiques.** — Lorsqu'un corps élastique en équilibre est écarté de sa position d'équilibre, sans toutefois dépasser la limite d'élasticité, sitôt que cesse l'action qui avait produit cet écart ses différents points se mettent en mouvement pour revenir à leur position d'équilibre; mais lorsqu'ils repassent à celles-ci, ils y arrivent avec une certaine vitesse acquise, la dépassent pour atteindre, de l'autre côté, une position où leurs vitesses s'annulent et à partir de laquelle les mêmes effets se reproduisent en sens inverse. On dit alors que les différents points du corps considéré oscillent, que le corps est animé d'un mouvement vibratoire.

Ce mouvement vibratoire est périodique (XXVIII); il est même périodiquement uniforme car, comme nous l'avons dit (12), on a démontré que tant que les déplacements des divers points d'un corps élastique restent petits, la durée de l'oscillation est indépendante de l'écart : les oscillations sont *isochrones*.

La connaissance complète d'un mouvement vibratoire comprend alors la détermination des éléments suivants : durée de la vibration, amplitude, loi de la vibration.

Comme nous le dirons, la sensation sonore permet de reconnaître l'existence d'un mouvement vibratoire et la durée de la période : elle renseigne incomplètement sur l'amplitude et sur la loi de la vibration. Mais il existe des moyens, indépendants de l'organe de l'ouïe, qui permettent d'étudier un mouvement vibratoire, et c'est par leur indication sommaire que, comme nous l'avons dit, nous commencerons l'étude de l'acoustique.

693. — Tous les corps élastiques sont susceptibles d'entrer en vibration, qu'ils soient solides, liquides ou gazeux; mais dans la pratique, on n'utilise que les solides et les gaz; c'est donc de ces corps que nous nous occuperons seulement d'abord et nous commencerons par les solides.

Considérons une lame élastique AB (fig. 354), libre à l'extrémité B, mais encastrée, fixée dans un étai en A. Si nous écartons l'extrémité B,

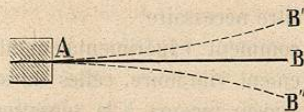


Fig. 354.

la lame fléchira et prendra la position AB'; si nous l'abandonnons ensuite à elle-même, elle oscille entre les positions extrêmes AB' et AB''. L'amplitude totale de l'oscillation, l'écart B' B'' va d'ailleurs en décroissant par suite des résistances

éprouvées, notamment la résistance de l'air; mais ces oscillations se prolongent cependant en général pendant un temps assez long.

Si, par suite des dimensions de la lame élastique, les oscillations ne sont pas trop rapides, 6 à 8 par seconde, on peut les suivre par l'œil, et se rendre compte de leur existence, sinon des éléments du mouvement vibratoire. Mais dès que les vibrations sont de plus courte durée, le phénomène de la persistance des impressions sur la rétine (466) intervient, la lame n'est plus vue *séparément* à chacune de ses positions, mais on la voit *simultanément* à toutes : il semble qu'il y ait un corps solide occupant tout l'espace entre AB' et AB'', et l'on n'a plus par l'œil la notion d'un corps en mouvement.

L'effet est le même si l'on prend une corde élastique tendue entre deux points fixes A et B (fig. 355) et qu'on l'écarte de sa position d'équilibre

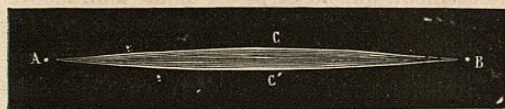


Fig. 355.

libre en la pinçant en son milieu, jusqu'à l'amener à prendre la forme ACB. En l'abandonnant à elle-même, elle oscillera entre cette position et la position symétrique AC'B. Comme précédemment, ces oscillations dureront un certain temps, mais diminueront peu à peu d'amplitude. Pour des dimensions convenables de la corde, ces oscillations seront lentes et on pourra les distinguer par la vue, les séparer, les compter même. Il n'en sera plus ainsi si les vibrations deviennent trop rapides à cause de la persistance des impressions sur la rétine : on voit alors seulement un faisceau renflé en son milieu.

Les faits se passent d'une manière analogue s'il s'agit d'une plaque métallique maintenue fixe en un de ses points et que l'on frappe en un autre point, quelle que soit la forme de cette plaque : là encore, on peut voir, distinguer les vibrations si elles sont lentes, elles cessent absolument d'être perceptibles par la vue si elles sont rapides; il est inutile d'insister.

Il importe de remarquer que si les vibrations ne sont pas perceptibles par la vision (sans parler, bien entendu, de l'audition que nous laissons

maintenant à part) elles peuvent l'être par le toucher. En effleurant du bout du doigt un des corps vibrant plus ou moins rapidement comme nous venons de l'indiquer, on éprouve, suivant la rapidité des vibrations, la sensation d'une sorte de frémissement particulier qui nous donne bien la notion d'un mouvement vibratoire, mais ne nous permet pas d'évaluer la durée, la fréquence des vibrations. L'expérience doit d'ailleurs être faite avec soin, car si le contact du doigt avec le corps vibrant n'est pas très léger, le mouvement vibratoire cesse immédiatement.

694. **Détermination des vibrations des solides.** — On peut, dans tous les cas, mettre en évidence le mouvement vibratoire d'un corps solide par des moyens mécaniques. S'il s'agit par exemple d'une lame élastique AB (fig. 356), on peut fixer à l'extrémité libre un style léger qui s'appuie contre la surface enfumée d'un cylindre enregistreur, soit que l'on prenne l'enregistreur Foucault à mouvement d'horlogerie (XXXI), soit plus simplement, s'il ne s'agit pas de faire de mesure, en prenant un cylindre C dont l'axe fileté dans une partie de sa longueur passe dans un écrou en D', mais tourne librement en D; le mouvement de la manivelle M produit alors un mouvement hélicoïdal du cylindre et si la pointe B est

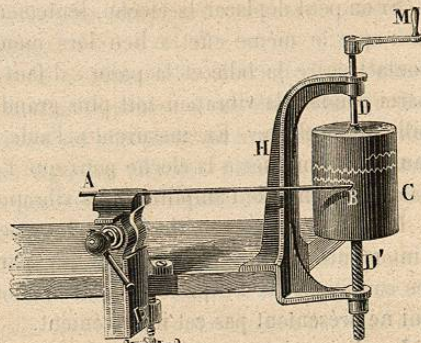


Fig. 356.

fixe, elle trace une hélice de même pas que la vis D'; mais si la lame AB a été écartée de sa position d'équilibre, cette hélice est remplacée par une ligne sinueuse dont chaque dent correspond à une vibration de AB.

Ce procédé peut être appliqué également aux plaques que l'on fait vibrer; il s'applique moins commodément aux cordes et aux membranes, le frottement du style sur le cylindre introduisant une résistance qui arrête rapidement le mouvement vibratoire.

Dans le cas des lames planes, plaques rigides ou membranes, on peut opérer autrement en les rendant horizontales et en les saupoudrant de sable fin. Si la lame est immobile, le sable restera en repos; il sautillera, au contraire, si la lame vibre. Disons même que l'observation des mouvements de ce sable permet d'étudier le mode de vibration de la lame.

Dans le cas des lames courbes, ayant la forme de cloche, on ne peut employer ce procédé, mais on peut mettre un liquide, de l'eau, à l'intérieur, le vase ayant été convenablement placé : la surface reste plane si la cloche est au repos, la surface présente des systèmes d'ondes (LXXI) si la cloche vibre.

Il est vrai que l'introduction du liquide change les conditions de l'expérience et qu'on ne peut déduire de celle-ci les effets qui se manifesteraient pour la cloche vide. Mais on peut

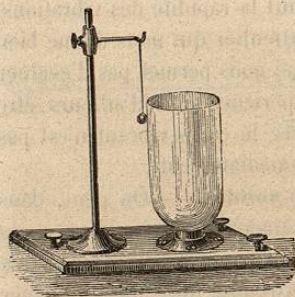


Fig. 357.

opérer autrement : on place la cloche à côté d'un petit pendule constitué par une bille métallique suspendue à l'extrémité d'un fil (fig. 357) de telle sorte que la bille touche la cloche ou en soit peu distante.

Le pendule restera immobile tant que la cloche sera en repos ; lorsque celle-ci sera en vibration, le pendule sera projeté par le choc de la paroi, puis retombera, pour être de nouveau projeté.

Si on peut déplacer la cloche, lentement, à l'aide d'une vis, on reconnaît que le même effet a lieu lors même que, au repos, il n'y a pas contact entre la bille et la paroi : il faut donc que le déplacement de la paroi pendant la vibration soit plus grand que la distance qui séparait la bille de la cloche. En mesurant à l'aide d'une vis le déplacement qu'il faut communiquer à la cloche pour que l'effet cesse, on a évidemment la valeur maxima de l'amplitude des vibrations.

Dans ces diverses méthodes quelque petite qu'elle soit, il y a toujours l'intervention d'un corps étranger qui, par sa présence, pourrait modifier les conditions de l'expérience : nous allons indiquer d'autres méthodes qui ne présentent pas cet inconvénient.

La chronophotographie peut être employée (550) pour prendre dans un temps très court, 1 seconde, un grand nombre d'images du corps : on reconnaît que, dans les diverses images le corps n'a pas la même forme. On peut également employer le disque stroboscopique, comme nous l'avons indiqué d'une manière générale (591).

Le miroir tournant peut aussi être utilisé : en un point d'un corps vibrant on fixe une perle de couleur claire ou une perle métallique que l'on regarde dans un miroir ; si celui-ci est immobile l'impression sera la même que si on regardait directement la perle et, si la vibration de celle-ci est un peu rapide, on verra seulement une petite ligne colorée ou brillante, fusion des impressions se succédant très rapidement et correspondant aux diverses positions de la perle. Mais si pendant que le corps vibre le miroir tourne, les images, comme nous l'avons dit (366), ne sont plus vues dans la même direction et leur ensemble donne naissance à une ligne sinueuse, tandis qu'elle serait droite si le point n'était pas entraîné dans un mouvement vibratoire.

On obtiendrait un effet absolument analogue avec le phénakisticope de projection.

Dans ces expériences et dans quelques autres qu'on pourrait disposer

en se basant sur des principes analogues, le mouvement vibratoire du corps élastique n'est en rien modifié dans ses conditions puisqu'aucune liaison matérielle n'existe entre le corps vibrant et l'appareil qui sert à l'observation.

695. **Détermination des vibrations des gaz.** — Il est moins facile de mettre directement en évidence le mouvement vibratoire des gaz que celui des solides, car en général les gaz ne sont pas directement visibles et ce n'est guère que dans le cas particulier des flammes, c'est-à-dire dans le cas des gaz lumineux qu'on peut y arriver. Les procédés que l'on peut employer sont d'ailleurs ceux que nous avons déjà indiqués, l'emploi du miroir tournant et du phénakisticope direct ou de projection ; dans ces divers cas si la flamme est au repos, ces appareils donnent une image constituée par une bande lumineuse de hauteur constante ; si, au contraire, la flamme vibre, le bord le plus lumineux, qui correspond à la pointe de la flamme, paraît dentelé.

Dans quelques cas, on met en évidence la vibration d'une masse gazeuse en y introduisant une flamme sensible qui ne vibre pas par elle-même, mais qui est dans un état tel qu'elle participe immédiatement aux mouvements de la masse dans laquelle elle est plongée. Les mêmes dispositions que précédemment permettent de reconnaître l'état de repos ou de vibration de ces flammes sensibles.

Ces flammes sensibles que l'on peut obtenir après quelques tâtonnements sont produites par la combustion du gaz d'éclairage, sous une pression un peu supérieure à celle qui existe généralement dans les conduites de distribution.

Les flammes n'agissent dans ce gaz que comme un jet de gaz visible ; aussi n'est-il pas étonnant qu'on ait pu réussir les mêmes expériences en étudiant l'écoulement d'un jet de fumée dans l'air : l'expérience est toutefois moins facilement visible.

On peut également mettre en évidence le mouvement vibratoire d'une masse de gaz en y introduisant une membrane élastique, mince et tendue ; il est commode de pouvoir faire varier la tension entre certaines limites. Si la tension a la valeur convenable, ce qu'on obtient après quelques tâtonnements, la membrane entre en vibration sous l'influence du mouvement du gaz et on reconnaît l'existence des vibrations de la membrane comme nous l'avons dit précédemment : tantôt la membrane, tendue sur un cadre circulaire, est placée horizontalement et on y a projeté une petite quantité de sable ; tantôt le cadre est placé verticalement et supporte un petit pendule qui rebondit quand la membrane vibre, c'est le tambour de Seebeck ; tantôt, au centre de la membrane est fixé un style assez léger pour ne pas troubler le mouvement de celle-ci : ce style s'appuie sur un cylindre enregistreur tournant comme nous l'avons dit précédemment ; cette disposition se rencontre dans le phonautographe dans lequel

la membrane est placée à l'une des extrémités d'un cornet parabolique dont nous expliquerons plus tard l'utilité (fig. 358)¹.

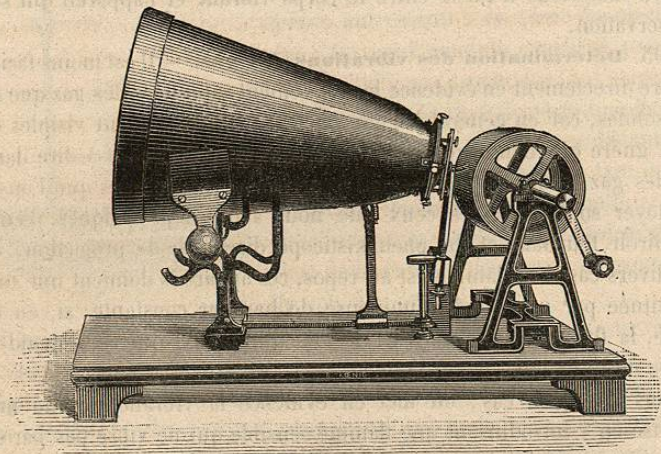


Fig. 358.

696. — Mais pour ce genre de recherche, il est plus commode d'employer les flammes manométriques de Kœnig. L'appareil consiste en une capsule dont une base est constituée par une membrane élastique tendue, en caoutchouc mince, généralement; sur l'autre base se trouvent deux ouvertures munies d'ajutages. D'un côté la capsule est mise en communication avec un tuyau de conduite de gaz d'éclairage; le gaz sort par l'autre ajutage, présentant une mince ouverture, où on l'enflamme; un robinet permet de régler la hauteur de la flamme.

Lorsque le gaz a pris un écoulement régulier, la flamme, dont la hauteur dépend de la quantité de gaz, reste invariable parce que l'écoulement se fait en vertu de la différence entre la pression du gaz dans la conduite et la pression atmosphérique, différence qui est constante; en même temps, et en vertu même de cette différence, la membrane bombe légèrement vers l'extérieur.

Si on vient à déplacer la membrane, les conditions d'écoulement changent; si on repousse la membrane vers l'intérieur, on produit une augmentation de pression qui se traduit par un allongement de la flamme. Si on maintenait la membrane fixe à la nouvelle position, la pression reprendrait sa valeur primitive, la flamme ses dimensions premières. Si, au contraire, on produit un mouvement de la membrane vers l'extérieur, l'augmentation de capacité produira une diminution de pression jusqu'à

1. Nous devons à l'obligeance de M. Kœnig la figure 358, ainsi que celles qui portent les numéros 359, 361, 368 et 373.

ce qu'il soit arrivé assez de gaz pour remplir l'accroissement de capacité: la flamme diminuera de hauteur, pour reprendre sa hauteur primitive si la membrane est maintenue à cette nouvelle position.

Supposons maintenant que nous placions cette capsule dans une masse d'air en vibration: si la tension de la membrane a une valeur convenable, cette membrane participera au mouvement vibratoire de l'air, produisant périodiquement des augmentations et des diminutions de capacité de la capsule et, par suite, des allongements et des raccourcissements de la flamme. Ces changements de dimensions sont en général trop rapides pour être observés directement, à cause de la persistance des impressions sur la rétine: mais ils sont mis nettement en évidence par les moyens déjà indiqués, le miroir tournant et le phénakisticope.

On peut donc aisément reconnaître par ce procédé si une masse de gaz est au repos ou animée d'un mouvement vibratoire. Il importe de remarquer que les effets observés dans ce dernier cas ne peuvent être obtenus dans d'autres circonstances, notamment qu'ils ne se produisent pas pour un déplacement de la masse d'air en totalité, pour un courant d'air: ce cas a pour effet de développer sur la membrane une variation de pression, mais la nouvelle pression subsiste sans changement tant que dure le courant d'air. D'après ce que nous avons dit plus haut, la flamme changera de dimensions au moment du début du courant d'air, mais reprendra sa longueur première puisque la membrane conserve une déformation constante. On observera seulement un nouveau changement, inverse du précédent, au moment où, le courant d'air cessant, la membrane reprend sa forme.

697. — Il est un certain nombre de cas, comme nous l'indiquerons, où il suffit de savoir s'il existe, en un point, des vibrations ou non. Mais dans d'autres circonstances il est nécessaire d'être renseigné sur les données qui caractérisent un mouvement vibratoire dont on a reconnu l'existence: les procédés précédemment indiqués ne sont pas alors tous capables de fournir ces renseignements; c'est ainsi que le sable projeté sur un corps vibrant, que le tambour de Seebeck ne peuvent donner aucune indication.

Une seule méthode peut faire connaître et mesurer tous les éléments du mouvement vibratoire, c'est celle de l'enregistrement direct. Comme nous l'avons indiqué (XXVIII), l'écartement des sommets des sinuosités consécutives donne l'amplitude de la vibration, que d'ailleurs il suffit, presque toujours, de comparer sans avoir besoin de la mesurer d'une manière précise. La forme de la courbe donne la loi du mouvement si le cylindre tourne d'un mouvement uniforme, ce qui est le cas dans les enregistreurs à mouvement d'horlogerie, mais non dans le cylindre enregistreur à vis de Duhamel (fig. 356). Enfin si on mesure l'intervalle δ de deux sommets consécutifs d'un même côté et si on connaît v la vitesse

de déplacement de la surface enfumée, on a en appelant θ la durée de la vibration, $\delta = v \theta$, puisque le mouvement est uniforme.

698. — En réalité, ce n'est pas ainsi que l'on opère, et l'on connaît rarement la valeur de v avec précision; mais on enregistre sur le cylindre, à côté de la ligne sinueuse tracée par le corps vibrant, le mouvement d'un style relié à un compteur de temps qui marque un trait à chaque seconde, par exemple. On peut d'abord vérifier que pour un corps vibrant donné, il y a toujours le même nombre de sinuosités entre deux traits consécutifs, quelle que soit l'amplitude de la vibration, ce qui montre bien que ces vibrations sont isochrones. On compte alors le nombre n de sinuosités entre deux traits: il y a donc n vibrations par seconde et la durée θ de la vibration est de $\frac{1}{n}$ de seconde.

On utilise d'ailleurs cette propriété de l'isochronisme des oscillations pour mesurer de petits intervalles de temps: on fait choix, par exemple, d'une lame vibrante, d'un diapason, qui exécute exactement 100 oscillations ou 1000 oscillations par seconde. Ce sont ces oscillations qu'on enregistre sur un cylindre tournant, à côté de la ligne qui correspond au phénomène que l'on veut étudier; chaque sinuosité complète correspond alors à un temps de 0^s,01 ou 0^s,001. Si on étudie un mouvement oscillatoire rapide, il suffit de compter les sinuosités de la courbe correspondante comprise entre 2 sommets de la courbe du diapason, ce qui est plus pratique que de compter le nombre souvent très grand correspondant à 1 seconde. De plus, lorsqu'il s'agit d'un phénomène de courte durée, la comparaison avec l'étendue correspondante à la durée de 1 seconde risquerait de ne pas présenter une grande exactitude.

Les images des flammes vibrantes peuvent être photographiées comme l'a montré M. Doumer, et si l'on a pris soin de photographier en même temps des points de repère, on pourrait évaluer la durée des vibrations ou le nombre par seconde. On aurait une idée également de l'amplitude et de la loi de la vibration par la mesure des dentelures et par la forme qu'elles présentent. Toutefois, il faut remarquer, d'une part, que la forme est toujours plus ou moins modifiée par le fait de la rotation du miroir, et, d'autre part, que dans le cas des flammes manométriques qui sont le plus employées on n'est pas assuré qu'il y ait absolument proportionnalité à chaque instant entre la hauteur de la flamme et le déplacement correspondant de la masse d'air en vibration, parce que l'action se produit par l'intermédiaire de la membrane élastique et de la masse de gaz contenue dans la capsule.

Aussi, le plus souvent l'observation des flammes manométriques sert-elle à la comparaison d'effets divers, comparaison qui se manifeste par des apparences faciles à apprécier, plutôt qu'à des mesures proprement dites.

699. **Propagation des vibrations.** — Les vibrations produites en un

point d'un corps élastique se propagent successivement à distance. Il est facile de mettre le fait en évidence par un certain nombre d'expériences.

Considérons d'abord un fil, une corde élastique, comme un tube de caoutchouc de plusieurs mètres de longueur, fixé à ses deux extrémités et modérément tendu. Si on produit un choc vers une extrémité, on verra prendre naissance une onde, analogue comme forme à celle que l'on observe à la surface des liquides, et qui se déplacera, se propagera jusqu'à l'autre extrémité. Comme nous l'avons dit pour les liquides (LXXI), rien de matériel ne se propage, chaque point ne fait qu'osciller transversalement par rapport à la direction du tube, seulement le mouvement ne commence que successivement pour les différents points.

Si le tube est gros et lourd, la vitesse de propagation est assez faible pour que l'onde puisse être facilement suivie par l'œil; il n'en est plus ainsi pour des fils métalliques minces, la propagation étant trop rapide; mais il est toujours possible, à l'aide de l'un des procédés indiqués précédemment, notamment par l'enregistrement direct, appliqué à différents points, de reconnaître que ces points sont mis successivement en vibration, qu'il y a propagation dans un temps fini.

Des expériences analogues peuvent être faites dans un milieu gazeux, dans l'air notamment: en frappant dans les mains, en provoquant l'explosion d'un mélange détonant, en tirant un coup de pistolet, on produit un déplacement de l'air qui peut être mis en évidence par une flamme sensible placée à distance ou, quoique moins facilement, par un des autres moyens que nous avons indiqués. L'expérience réussit mieux encore, et à une distance plus grande, si l'on opère dans une masse limitée de gaz, dans un tuyau de section petite relativement à sa longueur.

700. **Réflexion des vibrations.** — Lorsque des vibrations se propagent dans un milieu et qu'elles rencontrent un autre milieu, en général le mouvement vibratoire se partage en deux; une partie continue son chemin dans le deuxième milieu, une autre partie revient en sens contraire dans le premier milieu.

La communication du mouvement vibratoire d'un milieu à un autre donne lieu à des phénomènes analogues à ceux de la réfraction en optique; nous n'y insisterons pas actuellement, la question ayant été étudiée plus commodément à l'aide de l'oreille.

Au contraire, l'étude du mouvement vibratoire qui revient dans le premier milieu, l'étude du mouvement réfléchi peut aisément se faire à l'aide de procédés directs.

Des expériences analogues à celles que nous venons de citer montrent que lorsque des vibrations se propagent dans un milieu, si elles rencontrent un obstacle, ou plus généralement un milieu différent, elles se réfléchissent et reviennent en sens contraire dans le même milieu. Le fait est très net avec le tube de caoutchouc, s'il est assez long et que

L'onde ne se propage pas trop rapidement : on la voit d'abord parcourir le tube de l'extrémité où elle a été produite jusqu'à l'extrémité opposée, pour revenir en sens inverse et atteindre l'extrémité d'où elle est partie ; souvent elle subit en ce point une nouvelle réflexion. Quelquefois on peut voir l'onde parcourir le tube plusieurs fois alternativement dans un sens et dans l'autre.

L'expérience réussit également dans l'air, si à quelque distance du point où on a produit un déplacement brusque du gaz se trouve une surface dure et polie. Si, à côté d'une flamme sensible, on frappe des mains brusquement dans ces conditions, on voit la flamme s'agiter au moment même où l'action est produite, puis quelques instants après, plus ou moins tardivement suivant la distance où est placé l'obstacle, la flamme s'agite de nouveau, ce qui indique un nouveau passage d'un mouvement vibratoire : c'est le mouvement réfléchi.

701. — L'expérience réussit mieux encore si l'on opère dans un milieu limité, dans une conduite remplie d'air ou d'un gaz. Aux deux extrémités on place des membranes, munies de styles appuyant sur des cylindres enregistreurs, et à côté de l'une d'elles, on provoque une explosion, on fait partir un coup de pistolet : le mouvement produit est immédiatement enregistré sur la membrane. Puis, après un certain temps, l'autre membrane vibre, ce qu'indique la courbe qu'elle trace ; plus tard encore la courbe de la première membrane indique l'arrivée d'un nouveau mouvement qui provient de la réflexion sur l'extrémité opposée. La même action peut encore se reproduire et, même sur des longueurs de plusieurs kilomètres, on peut reconnaître plus de dix réflexions successives.

Un fait important à noter c'est que ce phénomène de la réflexion se produit aussi bien si les extrémités du tube sont fermées par des parois résistantes que si elles sont ouvertes à l'air libre ; seulement, dans ce dernier cas, en même temps que l'on peut mettre en évidence l'existence d'un mouvement vibratoire réfléchi, on peut reconnaître qu'il existe dans l'air libre un mouvement vibratoire qui se propage dans toutes les directions, comme si l'extrémité ouverte du tuyau était elle-même un centre de vibrations.

702. **Vitesse de propagation du mouvement vibratoire.** — L'étude des phénomènes qui se produisent dans la dernière expérience que nous venons d'indiquer conduit d'autre part à un résultat important : en évaluant, d'après les courbes tracées, les temps que le mouvement vibratoire a mis à parcourir successivement toute la longueur du tuyau, on reconnaît que ces temps sont tous égaux. On en conclut que le mouvement de propagation est uniforme ; on pourrait d'ailleurs le vérifier autrement, en plaçant à des distances différentes sur le trajet parcouru plusieurs membranes avec des cylindres enregistreurs, et notant que les temps employés sont proportionnels aux espaces parcourus (XXIV).

On peut alors déterminer la vitesse de propagation, en mesurant l'espace parcouru et le temps employé à le parcourir : le quotient des nombres obtenus donne la vitesse cherchée. Cette méthode a été appliquée par Regnault (1868), puis plus récemment par M. Violle qui a trouvé que cette vitesse dans l'air à 0° et à la pression normale de 76 centimètres est de 331^m,10 par seconde.

Il va sans dire que, pour cette mesure, il faut qu'il y ait concordance parfaite entre les indications du temps enregistrées aux divers appareils : on y parvient en employant un seul compteur dont l'action est transmise à tous les enregistreurs par un courant électrique qui agit, même à la distance de plusieurs kilomètres, sinon instantanément d'une manière absolue, au moins avec un retard excessivement petit et complètement négligeable dans la pratique.

703. **Surface d'onde. Longueur d'ondulation.** — Le fait de l'existence d'un mouvement vibratoire et de sa propagation conduit à des conclusions importantes ; nous parlerons surtout de ce qui se passe dans une masse gazeuse parce que c'est le cas qui se présente le plus fréquemment, mais les résultats sont entièrement analogues pour toute autre masse élastique.

La propagation d'un mouvement vibratoire dans l'air doit se comprendre comme celle qui se produit dans l'éther. Pendant que la source de vibration exécute une oscillation complète, le mouvement s'est propagé dans toutes les directions et, par raison de symétrie, à la même distance ; le lieu des points où le mouvement est ainsi parvenu constitue une *surface d'onde* qui, dans ce cas, est une surface sphérique, et la distance à laquelle, pendant ce temps, la propagation s'est faite est la *longueur d'ondulation* λ .

Chaque point de cette surface d'onde commence à vibrer au moment où la source de vibrations A entame sa 2^e oscillation ; à partir de ce moment, les mouvements seront donc concordants, et les points de la surface d'onde seront à chaque instant dans la même phase de leur vibration que le point A. Les points situés entre A et la surface d'onde ont commencé à vibrer avant les points de celle-ci, ils ne sont pas en concordance avec eux, ni avec A, et ils sont à une phase d'autant plus avancée qu'ils sont plus près de A, puisqu'ils ont commencé plus tôt. En particulier, les points situés à moitié distance entre A et la surface d'onde auront exécuté, à l'instant considéré, la moitié de leur oscillation complète, ils sont donc dans une phase exactement opposée à celle de A.

Mais le même effet continue, et pendant la 2^e oscillation de A, le mouvement vibratoire se sera avancé partout d'une même quantité λ : la 1^{re} surface d'onde sera alors une sphère de rayon 2λ . En même temps le mouvement propagé par A au commencement de sa 2^e oscillation se sera étendu partout à la distance λ , et formera une 2^e surface d'onde sphé-