

Section seconde.

Du sens de l'ouïe.

CHAPITRE PREMIER.

Des conditions physiques de l'audition.

Une impulsion mécanique imprimée à l'organe acoustique produit la sensation du bruit dans le nerf auditif. Lorsque cette impulsion vient à se répéter avec vitesse et d'une manière régulière, elle donne lieu à un bruit déterminable, qu'on appelle son. L'élévation ou l'acuité du son croît en proportion du nombre des impulsions dans un temps donné. Les vibrations de corps élastiques sont la plus fréquente de toutes les causes du son. Pendant l'action d'une scie, de la roue de Savart, ou de la sirène de Cagniard-Latour, de simples chocs, qui, par eux-mêmes, produisent tout au plus la sensation du bruit, acquièrent par leur accumulation la valeur d'un son déterminé. Un corps élastique vibrant qui, en comptant ses excursions des deux côtés, ferait mille oscillations par seconde, donnerait dans le même laps de temps cinq cents impulsions à l'organe auditif par l'intermédiaire de l'air ou du milieu conducteur du son. Ces impulsions correspondent parfaitement, quant au résultat, à cinq cents secousses d'un corps qui résonne par des chocs seulement, et non par des oscillations semblables à celles du pendule.

Que les sons soient produits par des oscillations ou par des heurts, la propagation des oscillations ou des secousses à l'organe auditif s'effectue toujours d'après les lois du mouvement ondulatoire, qui s'appliquent également à la formation pri-

mordiale des sons engendrés par des oscillations. Il faut donc commencer par traiter du mouvement ondulatoire.

I. Mouvement ondulatoire en général (1).

Quand l'équilibre des molécules d'un corps vient à être dérangé par une cause extérieure, son rétablissement est précédé d'un mouvement de ces mêmes molécules, en vertu duquel elles se rapprochent et s'éloignent alternativement de leur situation primitive. Lorsqu'on pousse un pendule de côté, il marche jusqu'à ce que sa force motrice soit devenue $= 0$; alors il est tiré de haut en bas par sa pesanteur, et tombe avec une vitesse accélérée; mais, ne pouvant point par cela même demeurer en repos, il remonte du côté opposé, et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'équilibre soit rétabli. Les mouvements par lesquels les molécules d'un corps se rapprochent et s'éloignent alternativement de leur position d'équilibre, sont appelés *vibrations* ou *ondulations*. Les ondulations sont ou des *ondes d'inflexion* ou des *ondes de condensation*. Dans le premier cas, la surface du corps se couvre de protubérances et de dépressions, sans que sa densité subisse aucun changement. Dans le second, l'onde consiste en une condensation sans changement de la surface: à la dépression des ondes d'inflexion correspond ici une raréfaction. L'oscillation est ou *progressive*, quand elle s'avance successivement à la surface du corps, ou *stationnaire*, quand elle ne change pas de lieu et ne fait que s'écarter à droite et à gauche.

A. Ondes d'inflexion des liquides.

Les ondes d'inflexion des liquides sont des changements que l'équilibre éprouve à leur surface et jusqu'à une certaine

(1) Consultez E.-H. WEBER et W. WEBER, *Wellenlehre*, Leipzig, 1825.

profondeur. La pesanteur est la cause de ce mouvement ondulatoire. Les ondes d'inflexion de l'eau sont beaucoup trop lentes pour pouvoir devenir la cause de sons. Cependant il importe d'en connaître les lois, car c'est en elles qu'on observe le plus facilement les lois du mouvement.

1. Ondulations progressives, ou ondes.

Quand l'équilibre d'un liquide est troublé sur un point, il se forme, autour de ce point, une onde circulaire, avec protubérance et dépression circulaires, qui se propage en dehors, et à laquelle succèdent de nouvelles ondes. Plus le choc a été fort, plus les ondes sont élevées, et plus leur vitesse est grande; mais celle-ci dépend aussi de la profondeur du liquide. Lorsqu'on produit des ondes dans une gouttière profonde et à parois parallèles, au moyen d'un choc dirigé sur toute la largeur de la gouttière, ces ondes marchent en ligne droite, et non circulairement. Du reste, le mouvement ondulatoire n'est point un mouvement progressif des particules de l'eau; car celles-ci restent en place pendant que les ondes passent par dessus. Les molécules du liquide éprouvent seulement, à l'endroit où une onde passe sur elles, une rotation qui dépend de ce qu'à l'arrivée de l'onde, elles sont situées à sa partie inférieure, tandis que, durant la marche de cette onde, elles en gagnent successivement le sommet: l'onde continue cependant son cours, et les molécules d'eau descendent le long du versant postérieur jusque dans la dépression, d'où elles remontent à l'approche de l'onde suivante.

Toutes les fois que deux ondes, d'égale hauteur et provenant de lieux opposés, se rencontrent, elles se croisent sans se porter obstacle l'une à l'autre. La protubérance de l'une et celle de l'autre se confondent, et en forment une de hauteur double; les deux dépressions font de même. Ici deux forces qui agissent en sens contraire sollicitent les molécules du li-

quide à des rotations en sens opposé. Ces sollicitations se détruisent mutuellement, et les molécules ne se meuvent que verticalement. Après le croisement, les ondes continuent de marcher chacune dans sa direction.

Si, à la rencontre de deux ondes, la protubérance de l'une coïncide avec la dépression de l'autre, elles se détruisent réciproquement, et le point demeure uni. Après le croisement, les ondes reprennent leur direction.

Lorsque des ondes parallèles se croisent avec d'autres ondes parallèles ayant une direction différente, mais non opposée, les divers cas qui viennent d'être passés en revue ont lieu à la fois sur des points différens. Supposons que, dans

Figure 60, la figure 60, les lignes pleines représentent les protubérances des ondes, et les lignes ponctuées leurs dépressions, il arrive qu'aux points où les premières se croisent, des protubérances d'une hauteur double se forment, qu'à ceux où les secondes se croisent, des dépressions d'une profondeur double ont



lieu, et qu'à ceux où les lignes pleines se croisent avec les lignes ponctuées, la protubérance des unes et la dépression des autres se détruisent mutuellement, de sorte que ces endroits demeurent unis. C'est là l'interférence des ondes.

Les ondes sont réfléchies par les parois des corps solides. Leur réflexion a lieu sous le même angle que leur incidence, comme pour la lumière. Supposons une onde décomposée en une série de forces qui marchent côte à côte, chaque partie de cette onde est réfléchiée par la paroi solide sous un angle égal à celui sous lequel elle le choque, d'où résulte un système de parties réfléchies d'ondes formant ensemble une onde réfléchiée, et qui ont ou la même direction que les ondes primordiales, ou une direction différente. Les ondes réfléchies et les ondes primordiales ont une même direction quand on excite des ondes en ligne droite dans une gouttière profonde,

et que leur direction est perpendiculaire à la paroi réfléchissante, ou aussi lorsque des ondes circulaires partent d'un point, et choquent une paroi qui décrit elle-même un cercle autour de ce point : dans ce dernier cas, les ondes réfléchies reviennent vers le centre du cercle.

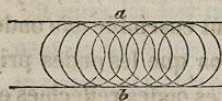
Une onde circulaire qui rencontre une paroi droite subit la même réflexion que si elle venait d'un point, situé derrière cette paroi, à une distance égalant celle qui est comprise entre celle-ci et le centre de l'onde primitive.

Les ondes qui partent d'un des foyers d'une ellipse, à la périphérie de laquelle elles rencontrent une paroi, sont réfléchies de telle sorte qu'au retour leur centre coïncide avec l'autre foyer de l'ellipse, attendu que l'angle de réflexion est égal à celui d'incidence.

Par la même raison, celles qui partent circulairement du foyer d'une parabole, à la périphérie de laquelle elles rencontrent une paroi, reviennent sur elles-mêmes suivant une ligne droite parallèle à l'axe de la figure. De même, les ondes rectilignes qui suivent une direction parallèle à l'axe d'une parabole sont réfléchies par les parois de celle-ci, de telle sorte qu'à leur retour elles aient pour centre commun son foyer, où, en conséquence, elles se réunissent circulairement et concentriquement. Donc, quand des ondes circulaires, partant du foyer d'une parabole dont les parois les renvoient transversalement dans une direction parallèle à l'axe, viennent à rencontrer un second segment de parabole, elles éprouvent une nouvelle réflexion qui les fait coïncider au foyer de cette seconde figure.

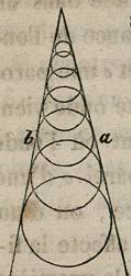
Figure 61.

Vient-on à produire des ondes dans l'eau par un choc ayant lieu suivant la longueur d'une ligne, on peut se représenter chaque point de cette ligne comme un centre d'ondes circulaires dont le départ est simultané, et qui, par conséquent, conservent toujours la même



dimension dans leur course ultérieure. De la superposition des cercles, il résulte, parallèlement à la ligne d'où le choc est parti, une plus grande onde droite, antérieure et postérieure (a b).

Fig. 62.

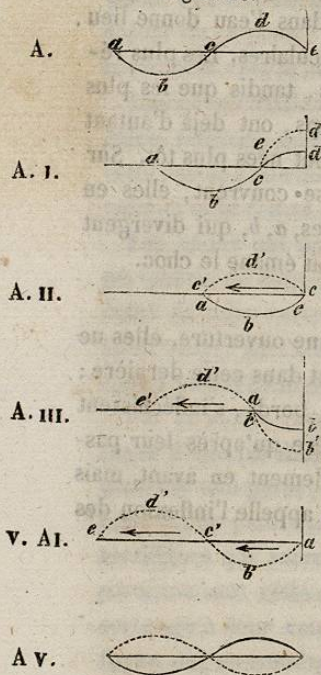


Un corps qui chemine dans l'eau donne lieu sans cesse à des ondes circulaires. Les plus récentes sont encore petites, tandis que les plus anciennes, derrière le corps, ont déjà d'autant plus d'étendue qu'elles sont nées plus tôt. Sur les côtés, où ces ondes se couvrent, elles en produisent de plus grandes, a, b, qui divergent en s'éloignant du corps d'où émane le choc.

Quand des ondes passent à travers une ouverture, elles ne conservent pas la forme qu'elles avaient dans cette dernière; leurs extrémités, en passant près des bords, s'infléchissent circulairement autour deux, de manière qu'après leur passage les ondes s'étendent non pas seulement en avant, mais encore sur les côtés. C'est là ce qu'on appelle l'inflexion des ondes.

2. Ondulations stationnaires.

Figure 63.



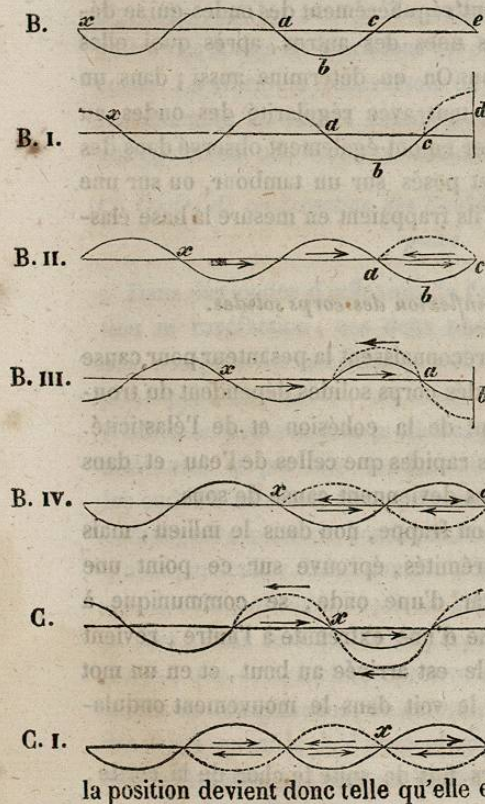
Supposons que $abcde$ (fig. A.) représentent une onde excitée dans un liquide; cde , la protubérance de l'onde; abc , sa dépression; et e une paroi solide contre laquelle cette onde vient battre. Il y a un moment où l'onde s'est rapprochée de la paroi e d'une moitié de sa protubérance, ou d'un quart de sa longueur, et affecte la figure $abc d$ (A I). Alors la première moitié de sa protubérance est déjà réfléchiée, de sorte que la demi-protubérance appliquée à la paroi se compose d'une demi-onde progressive cd , et d'une demi-onde réfléchiée $d'e'$, ce qui fait qu'elle est plus haute. Après un second moment, l'onde s'est avancée vers la paroi jusqu'à sa dépression, et toute sa protubérance est réfléchiée.

Dans AII, abc est la dépression de l'onde, $c'd'e'$ sa protubérance réfléchiée, et toutes deux s'effacent mutuellement, de sorte que l'endroit est uni pendant le second moment. Après un troisième moment, la dépression de l'onde s'est aussi avancée de moitié, et il n'en reste plus que la moitié ab . Dans AIII, la première moitié de la dépression est déjà réfléchiée, $b'c'$; mais la protubérance, qui avait été précédemment réfléchiée, a rétrogradé de la moitié de sa longueur, $c'd'e'$. Après un quatrième moment, la seconde moitié de la dépression de l'onde, primitive a achevé sa course et elle est réfléchiée, $a'b'c'$, tandis que la protubérance réfléchiée avant elle s'est reculée de la seconde moitié de sa longueur. Ainsi (A IV), après ces quatre momens, la position de l'onde

réfléchiée, $a'b'c'd'e'$, est la même que celle de l'onde primitive avant le premier moment, mais inverse, de manière (A. v.) que là où était la protubérance de la première, se trouve la dépression de la seconde, et que la dépression de celle-là a été remplacée par la protubérance de celle-ci.

Si maintenant, derrière la première onde primordiale B $abcde$, s'en trouve une seconde xa , la situation sera, après le premier moment, comme dans la fig. BI, après le second, comme dans la fig. BII, après le troisième, comme dans la fig. BIII. Alors la protubérance de la seconde onde primordiale et celle de la première onde réfléchiée se couvrent. D'où il suit que là se trouve une protubérance plus élevée. Après le quatrième moment, la protubérance de la seconde onde primordiale couvre la dépression de la première onde réfléchiée, et réciproquement. A ce moment la surface sera unie (B IV). Pendant, le moment suivant, les deux sortes d'ondes ont encore marché du quart d'une onde entière en sens inverse, c'est-à-dire que les parties qui se couvraient auparavant, se sont éloignées l'une de l'autre d'une demi-longueur d'onde; la position devient donc telle qu'elle est représentée en C, où

Figure 64.



Après le quatrième moment, la protubérance de la seconde onde primordiale couvre la dépression de la première onde réfléchiée, et réciproquement. A ce moment la surface sera unie (B IV). Pendant, le moment suivant, les deux sortes d'ondes ont encore marché du quart d'une onde entière en sens inverse, c'est-à-dire que les parties qui se couvraient auparavant, se sont éloignées l'une de l'autre d'une demi-longueur d'onde; la position devient donc telle qu'elle est représentée en C, où

les dépressions se couvrent, ainsi que les protubérances, d'où résultent et une protubérance plus haute et une dépression plus profonde. Dans le sixième moment (C 1), les protubérances recouvrent de nouveau les dépressions. Ces ondes qui se répètent régulièrement portent le nom d'ondes stationnaires. Ici les protubérances et les dépressions ne s'avancent point sur d'autres parties du liquide, et les changemens verticaux demeurent à la même place. Ce sont des élévations et des dépressions verticales alternatives, suite de deux mouvemens ondulatoires qui se croisent.

On produit des ondulations stationnaires dans une gouttière droite, en y excitant régulièrement des ondes qui se développent à la suite les unes des autres, après quoi elles éprouvent une réflexion. On en détermine aussi, dans un vase circulaire, en excitant avec régularité des ondes au milieu. Les frères Weber en ont également observé dans des vases pleins de liquide et posés sur un tambour, ou sur une chaise de canne, lorsqu'ils frappaient en mesure la base élastique.

B. Ondes d'inflexion des corps solides.

Les ondes d'inflexion reconnaissent la pesanteur pour cause dans les liquides; celles des corps solides dépendent du trouble et du rétablissement de la cohésion et de l'élasticité. Elles sont beaucoup plus rapides que celles de l'eau, et, dans des corps élastiques, elles deviennent cause de sons.

Une corde tendue qu'on frappe, non dans le milieu, mais près d'une de ses extrémités, éprouve sur ce point une dilatation qui, à l'instar d'une onde, se communique à la corde entière, marche d'une extrémité à l'autre, revient sur elle-même quand elle est arrivée au bout, et en un mot se comporte comme on le voit dans le mouvement ondulatoire des liquides.

Si l'on répète plusieurs fois de suite le choc de la corde,

des ondes régulières se succèdent, comme sur l'eau, et ces ondes étant réfléchies à l'autre bout de la corde, il s'ensuit que le croisement d'ondulations opposées donne lieu à des ondes stationnaires, comme dans le cas dont il a été parlé plus haut. C'est ainsi que de vibrations progressives il résulte des vibrations stationnaires. Les points de repos entre les ondes portent le nom de nœuds.

La plus simple vibration stationnaire d'une corde n'est cependant pas celle qui procède de vibrations progressives, mais celle qui a lieu quand la corde vibre entre ses points d'attache, ou la vibration transversale. En pareil cas, les points d'attache sont les nœuds. Le moyen le plus facile de faire naître ces sortes de vibrations est de pincer ou de frotter une corde. La vibration transversale de corps rigides non tendus, par exemple de verges métalliques fixées à l'un des bouts, est également une vibration stationnaire.

C. Ondes de condensation des liquides, des gaz et des corps rigides.

Dans les ondes d'inflexion de l'eau, il n'y a ni condensation ni raréfaction; ces deux phénomènes n'accompagnent pas non plus nécessairement celles d'une corde. Si la corde n'est point extensible, ou n'est point élastique, les ondes d'inflexion peuvent être produites par une simple torsion des molécules et par leur tendance à se redresser. A la vérité, les ondes d'inflexion des cordes sont la plupart du temps accompagnées aussi de condensation et de raréfaction. Ce qu'il y a de particulier dans les ondes d'inflexion, c'est qu'un grand nombre de molécules reçoivent simultanément un mouvement si fort, dans une direction perpendiculaire à la surface du corps, que cette surface éprouve un changement visible. Les ondes de condensation, au contraire, se produisent, dans tous les corps, quand le choc ne meut que les plus petites molécules, successivement et l'une par l'autre. Aussi les nomme-t-on en-

core ondes du choc progressif. Le choc que les particules mises en mouvement impriment aux suivantes donne nécessairement lieu à une condensation, qui, à son tour, détermine une raréfaction derrière elle. Le mouvement propagé de molécule à molécule est d'ailleurs si petit, qu'aucun changement ne devient visible à la surface des corps. C'est ainsi que le choc parcourt toute une série de billes, sans que celles-ci changent de place.

La direction du mouvement des molécules, que produit le choc condensateur, peut, dans une verge ou dans une corde, différer de celle suivant laquelle l'onde de condensation marche. Si, par exemple, la verge ou la corde a ————— b vient à être frappée, dans le voisinage de a , perpendiculairement à sa longueur, les particules mises en mouvement poussent les particules voisines dans la même direction, c'est-à-dire perpendiculairement vers $a b$, et celles-ci font de même pour les suivantes, jusqu'à ce qu'en dernier lieu b se meuve : donc, toutes les particules comprises entre a et b sont successivement mues ou mises en état de condensation dans une direction perpendiculaire à $a b$; en d'autres termes une onde court depuis a jusqu'à b , pendant que le mouvement des molécules par le choc est tout différent, c'est-à-dire perpendiculaire à $a b$. Si le choc a été donné au milieu de la verge, l'onde marche en deux sens, vers a et vers b . De semblables ondes naissent aussi dans une plaque, comme l'a montré Savart.

La propagation du choc dans des corps affectant les trois dimensions, par exemple dans des rochers, dans de l'eau, dans des masses d'air, a lieu de tous les côtés. Celle du son, dans tous les corps, s'opère par propagation du choc ou des ondes de condensation.

Les ondes qui sont excitées dans l'air consistent en condensations et raréfactions progressives. Le point condensé est la protubérance de l'onde, et le point raréfié en est la dé-

pression. Une onde d'air qui marche dans un tuyau revient sur elle-même quand ce tuyau est fermé à l'extrémité, et conserve ses propriétés au retour. Elle revient également d'une manière incomplète dans un tube ouvert; mais l'expérience enseigne qu'elle acquiert alors des propriétés inverses, qu'elle devient raréfiante quand elle était condensante, et *vice versa*. En plein air, les ondes sont sphériques.

II. Ondes stationnaires et progressives des corps résonnans.

Les corps résonnans produisent, quand ils vibrent, ou des ondes d'inflexion ou des ondes de condensation. Les unes ou les autres, ou toutes deux à la fois, s'observent dans les cordes et les corps solides qui résonnent. Les masses d'air résonnantes n'ont que des ondes de condensation. Les ondes des corps résonnans sont tantôt stationnaires, tantôt progressives.

Lorsqu'on soulève une corde dans son milieu, et qu'ensuite on l'abandonne à elle-même, on ne remarque pas d'ondes progressives, ou elles ne sont point très-prononcées. Mais la corde vibre de droite et de gauche dans toute l'étendue de l'écart qu'on lui a donné; elle vibre de toute sa longueur dans une direction transversale, comme le fait un pendule. Arrivée au terme de son excursion, elle cherche à redevenir rectiligne, en vertu de son élasticité; mais la vitesse dont elle est animée la rejette au-delà de la ligne droite, du côté opposé, et ainsi de suite jusqu'au moment du repos. C'est là une vibration stationnaire.

La vitesse de ses oscillations, ou le nombre de chocs qu'elle imprime à l'air, croît en raison inverse de sa longueur et en raison directe des quarrés des forces qui la tendent, c'est-à-dire qu'une corde qui fait cent vibrations par seconde, en fait deux cents lorsqu'on réduit sa longueur de moitié, sans modifier la tension, et que si, sa longueur demeurant la même, elle donne cent vibrations par seconde avec une tension d'une