

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

once, elle en donnera deux cents avec une tension de quatre onces, et quatre cents avec une tension de seize onces.

Les verges aussi sont susceptibles de vibrations transversales stationnaires. Ici le nombre des vibrations est en raison directe de l'épaisseur des verges et inverse des carrés de leur longueur.

Dans certaines circonstances, une progression longitudinale de la crête de l'onde est accompagné d'une vibration transversale stationnaire de la corde, sans que pour cela le nombre des vibrations devienne autre qu'il n'est dans la simple vibration transversale. Par exemple, qu'on pince la corde au voisinage de son point d'attache, elle ne fait pas seulement des vibrations transversales, comme lorsqu'on la pince dans le milieu de sa longueur, c'est-à-dire des vibrations transversales à longueur d'onde égalant la longueur de la corde, mais la crête de l'onde court alternativement d'une extrémité à l'autre, attendu que chaque fois qu'elle rencontre les points d'attache, elle revient vers le côté opposé de la corde. Le nombre des vibrations d'une corde qui vibre ainsi est absolument le même que quand cette corde vibre à situation constante de la crête de l'onde dans son milieu, et comme l'élévation du son dépend du nombre des vibrations dans un temps donné, elle est la même dans les deux cas ; mais le timbre diffère un peu. Cette circonstance est importante pour la théorie du timbre.

Il se produit aussi des ondes stationnaires lorsque, soutenant doucement la corde par dessous, ou appuyant légèrement le doigt dessus, on donne lieu à un nœud, et qu'ensuite on frotte la portion isolée. Par exemple, qu'on touche la corde dans le milieu, puis qu'on passe un archet de violon sur l'une de ses moitiés, non seulement cette moitié éprouve des vibrations transversales, mais encore l'autre en offre dans une direction opposée. Alors le nombre des vibrations est double de celui des vibrations de la corde entière, et le son produit est l'oc-

tave du son fondamental. Si l'attouchement ou l'appui a lieu entre le premier et le second tiers, il se forme aussi de soi-même un nœud entre le second et le troisième tiers, et le nombre des vibrations est triple de celui de la corde entière. On peut de même, en isolant un quart, un cinquième, etc., déterminer une division régulière de la corde entière en quarts, en cinquièmes, par des nœuds qui s'établissent d'eux-mêmes. Des chevrons de papier placés sur les nœuds ne sautent point pendant la vibration. Les sons ainsi produits sont appelés sons de flageolet.

Des plaques qu'on fait vibrer au moyen de l'archet, se partagent régulièrement en quatre, six, huit, parties aliquotes, vibrant en des directions opposées, et entre lesquelles se trouvent les lignes nodales de repos, qui ne rejettent point le sable étalé à leur surface. Il suffit de toucher le bord de la plaque sur un point pour faire naître une ligne nodale, qui devient déterminante pour la séparation des autres. Le seconde détermination part du point sur lequel passe l'archet. Ce point appartient aux parties mues, et agit d'une manière déterminante sur la formation des segmens mis en mouvement. C'est là dessus que reposent les figures de Chladni.

Les vibrations, tant stationnaires que progressives, des corps élastiques peuvent produire des sons dans notre organe auditif, quand elles se répètent régulièrement. Car les vibrations stationnaires deviennent aussi des ondes progressives lorsqu'elles sont communiquées aux corps conducteurs du son, puisque toute vibration excite une onde progressive dans l'air, dans l'eau, ou dans les corps solides conducteurs du son.

Des corps solides peuvent, tout aussi bien que l'air contenu dans des tuyaux, résonner par des ondes de condensation progressives. Les verges donnent des ondes de condensation longitudinales, quand on les frotte dans le sens de leur longueur.

Une corde peut aussi produire des sons sans vibrations

transversales, par de simples ondes de condensation progressives. La durée de l'allée et de la venue des condensations et des raréfactions, qui détermine le nombre des ondes excitées dans l'air, dépend naturellement de la longueur et de la tension des cordes. Mais, sans des chocs continuellement répétés, ces ondes ne conservent pas la force et la durée requises, tandis que les vibrations transversales des cordes durent plus long-temps. Le frottement produit ces chocs continuellement répétés. Cependant il est une modification des chocs au moyen de laquelle on exerce aussi de l'influence sur la rapidité de la succession des ondes longitudinales. Tel est le cas des vibrations longitudinales des cordes, que Chladni excitait par le frottement dans le sens de la longueur. Les sons de harpe éolienne des cordes paraissent aussi le ranger ici. Pellisov (1) prétend qu'il n'y a point de vibration transversale commensurable dans les sons de harpe éolienne produits au milieu de l'air. Suivant la force du vent, il se produit des sons harmoniques différens, sans qu'on aperçoive de nœuds. Pellisov a de plus indiqué un moyen de faire rendre des sons fort différens à une corde de violon, dont la tension demeure la même, en modifiant la manière dont on la frotte. Ce moyen consiste à poser l'archet tout près du chevalet d'une corde de violon longue de deux pieds, épaisse d'un tiers de ligne, et montée en *sol*, et à la frotter aussi légèrement que possible, d'une manière toujours égale. Le son se règle alors tout-à-fait d'après la force et la rapidité du frottement, et l'on peut produire avec facilité, non seulement tous les sons que la corde donne d'ailleurs au moyen du vent, ou tous les sons de la harpe éolienne, *sol*, *re*, *sol*, *si*, *ré*, *fa*, *sol*, *la*, mais encore la plupart de ceux qui sont intermédiaires, et d'autres plus élevés. Dans cette circonstance, suivant Pellisov, les vibrations de la molécule que l'archet touche immédiatement courent à

(1) POGENDORFF, *Annalen*, XIX, 237.

l'extrémité opposée, et y sont réfléchies. En tenant l'archet d'une manière particulière, il a produit, sur des cordes, des sons plus graves que leurs sons fondamentaux, et qui par conséquent ne dépendaient pas de vibrations transversales.

Pellisov va plus loin encore : il prétend que, même dans les vibrations transversales de la corde, le son n'est pas produit par celles-ci, mais par les allées et venues des ondes de condensation et de raréfaction, qu'il nomme aussi vibrations moléculaires. D'après la manière de voir ordinaire, ces petites ondes d'un corps élastique, qui partent du point où le choc a lieu, et qui se communiquent à la totalité du corps en vertu de l'élasticité, n'entrent en ligne de compte qu'en tant qu'elles produisent pour résultat la vibration du corps entier entre ses extrémités ou entre ses nœuds de vibration. Pellisov pense, au contraire, que le son dépend de la rapidité avec laquelle vibrent les plus petites parties de la corde, de la colonne d'air, de la verge, de la plaque, etc. Les vibrations de la corde, de la colonne d'air, de la plaque entière, ou de leurs grandes divisions n'ont d'importance ici qu'en ce qu'elles agissent comme cause déterminante par rapport à la rapidité de la vibration moléculaire. D'après cela, il ne se produirait point de son si une corde vibrait transversalement, sans que ses molécules fissent chacune des vibrations, c'est-à-dire sans les ondes condensantes progressives, qui vont et viennent entre les nœuds.

Quoiqu'on ne puisse pas regarder comme prouvée l'hypothèse de l'impuissance des vibrations transversales des cordes à produire des sons, cependant la simultanéité de ces vibrations et des ondes condensantes progressives, allant et venant dans un corps résonnant, fait très-bien concevoir la manifestation de certains sons. Indépendamment du son fondamental, une corde en donne aisément un autre léger et harmonique avec celui-là, l'octave de la quinte, ou la double octave de la tierce.

On connaît aussi les sons harmoniques que fait entendre une cloche.

Dans l'air des sifflets il n'y a point de vibrations transversales, mais seulement des ondes condensantes progressives et récurrentes. Bien que continu, le souffle détermine un effet intermittent. Le nombre des ondes dans un temps donné, ou, ce qui revient au même, leur épaisseur, dépend de la longueur de la colonne d'air contenue dans le tuyau.

Lorsqu'on souffle modérément dans les sifflets couverts, on fait naître leur son fondamental, pendant la durée duquel le nœud de vibration se trouve à l'extrémité de la colonne d'air. Dans le sifflet ouvert, le nœud de vibration est placé au milieu, et le son plus élevé d'une octave. En soufflant plus fort, on produit encore d'autres divisions de la colonne d'air, et par conséquent des sons plus aigus.

Du reste, quant à ce qui regarde les lois auxquelles sont assujétis les instrumens de musique, je dois renvoyer au chapitre de la voix, où la théorie de ces instrumens a été exposée.

Il me reste encore à expliquer la différence qui existe entre son, bruit et timbre.

Toute impression produite sur l'organe auditif par une onde qui lui est communiquée, ou par plusieurs ondes, est un son. Un seul ébranlement donne lieu à un son simple, qu'on appelle explosion lorsqu'il est fort. La force du son dépend de l'amplitude de la vibration des molécules. Sa qualité peut varier beaucoup. Le bois, le carton, les métaux ont des qualités de son différentes. Ces qualités paraissent dépendre, en partie de la forme de l'onde, en partie de l'isochronisme d'ondes animées d'une vitesse diverse. Un corps, quand il n'a pas la même élasticité dans tous les sens, peut aussi, lorsqu'on l'ébranle, produire, en différens endroits, des ondes de longueur différente, qui se transmettent, à un plus ou moins long intervalle l'une de l'autre, du corps résonnant au corps con-

ducteur du son, et qui communiquent à ce dernier une onde composée, de forme particulière. Cette onde composée, ou la somme d'ondes, arrive à l'organe auditif dans le même ordre et dans la même forme qu'elle avait en traversant le milieu conducteur, puisque toutes les vibrations sont propagées avec une égale vitesse par un corps conducteur du son. Ce qui contribue encore à la qualité du son, c'est qu'un corps peut accomplir en même temps une vibration transversale et une vibration longitudinale. Une corde pincée près de son extrémité, et abandonnée à elle-même, exécute des vibrations transversales dans toute sa longueur, tandis qu'en même temps la crête de l'onde court alternativement d'un bout à l'autre, en revenant chaque fois de l'autre côté de la corde. De là vient que la qualité du son d'une même corde varie un peu, à égalité de longueur et de tension, suivant le point où l'on pince cette corde. Enfin, Pellisov et Eisenlohr pensent que la forme de l'onde est modifiée aussi par la densité du corps résonnant. Dans un corps dense, l'excursion de la vibration est moindre que dans un corps qui a moins de densité. Les molécules d'air qui le touchent sont repoussées par lui d'une manière plus isochrone, et l'espace raréfié qu'il laisse en se contractant est plus étroit. Enfin, lorsque la densité du corps résonnant n'est point uniforme, la condensation communiquée à l'air, et la raréfaction qui y succède, ne doivent pas l'être non plus.

Quand plusieurs ondes se succèdent l'une à l'autre, il se produit un son plus ou moins soutenu, qui est tantôt un bruit, et tantôt un son proprement dit ou appréciable. Une succession de sons égaux ou inégaux dans des temps inégaux donne lieu au bruit (cliquetis, grattement, bourdonnement, etc.). Une succession de sons simples ou de bruits dans des temps égaux, n'est point perçue comme son proprement dit, tant qu'on distingue encore chacun des ébranlemens; il ne résulte de là qu'un bruissement. Dès qu'on ne peut plus distinguer les

ébranlemens, il y a son proprement dit, dont l'élévation ou l'acuité varie suivant la vitesse avec laquelle se succèdent les ébranlemens. C'est ce qu'on apprécie très-bien avec la roue de Savart, dont les dents ne produisent que du bruit aussi longtemps qu'on peut distinguer les chocs; mais, lorsque ceux-ci se succèdent plus vite, les bruits se confondent en un son, quoiqu'on puisse encore continuer d'entendre le bruit. D'où il suit que ce n'est pas seulement une succession régulière d'ondes simples, mais encore une succession régulière d'ondes très-composées ou bruyantes, qui devient un son musical.

Un son éclatant est celui que produisent des ondes simples, d'une force suffisante, sans ondes irrégulières intermédiaires, c'est-à-dire sans bruit. La qualité de l'éclat, ou le timbre d'un son, dépend des mêmes causes que la qualité du son simple: il n'y a de plus ici que la succession régulière des ondes.

III. Mouvement ondulatoire dans la propagation du son.

A. Ondes progressives dans la propagation du son.

La propagation des vibrations de corps résonnans a lieu, généralement, par des ondes de condensation et de raréfaction, et non par des ondes d'inflexion. L'eau aussi conduit les ondes sonores de cette manière. Ce mode de mouvement est donc totalement différent des ondes d'inflexion de l'eau.

Un ébranlement communiqué à l'air, à partir d'un point, et dans toutes les directions, détermine une onde sphérique d'air condensé, ayant la forme d'une boule creuse, qui s'étend d'une manière uniforme en tous sens, et conserve par conséquent sa forme sphérique. Une sphère qui se dilaterait tout à coup dans l'air, produirait une onde de ce genre. Les molécules de l'air repoussées par la boule qui se distend, acquièrent un mouvement correspondant à cette distension dans la direction du rayon, et pendant le moment qui succède im-

médiatement, lorsque la boule, revenant sur elle-même, détermine une raréfaction à sa périphérie, elles y acquièrent un mouvement en sens inverse. Toutes les molécules de l'air à travers lequel passe l'onde sphérique acquièrent ainsi le même mouvement. Mais l'amplitude de l'excursion que ces molécules font en avant et en arrière, et qui, en la comparant avec les ondes de l'eau, correspond à l'élévation de la protubérance de l'onde, diminue à mesure que l'onde avance, tandis que l'épaisseur de celle-ci demeure la même pendant son expansion, absolument de même qu'une onde sphérique produite sur l'eau s'abaisse, tout en conservant la même largeur, à mesure qu'elle prend de l'extension. La sphère creuse de l'onde progressive croît donc en raison proportionnelle des quarrés de son diamètre. La protubérance de l'onde diminue dans le même rapport. C'est ce qui fait que l'intensité du son diminue à l'air libre, en raison de l'accroissement des carrés des distances comprises entre l'onde sonore et le lieu de son origine. Il n'y a pas de motif pour que ce décroissement ait lieu à l'égard du mouvement ondulatoire de l'air dans un tuyau.

Si le corps ébranlant ou vibrant n'imprime point à l'air libre un choc en tous sens, comme ferait une sphère qui se dilaterait, mais qu'il ne lui en donne que dans une seule direction, l'onde résultante de là est également sphérique, tout comme une onde, déterminée sur l'eau par un choc en un seul sens, n'en marche pas moins dans toutes les directions, et affecte conséquemment une forme circulaire. Cependant la grandeur de la protubérance de l'onde, ou l'amplitude de l'excursion que font les molécules de l'air à travers lesquelles passe l'onde, est plus forte dans la direction du choc, parce qu'elle dépend en partie de cette direction elle-même. D'après cela, si les ondes sonores affectent une direction quelconque dans le corps résonnant, comme cela a lieu lorsqu'une corde ou une colonne d'air vibre, le son est également plus fort et plus distinct dans cette direction. Il me paraît que la circonstance