

*La surface de séparation de deux liquides superposés est plane et horizontale.*

De même, lorsque l'on a des vases communicants contenant deux liquides de telle sorte que l'un des vases ne comprenne qu'un seul des deux liquides, on voit que :

*Les hauteurs des surfaces libres au-dessus de la surface de séparation sont en raison inverse des poids spécifiques des liquides.*

**LXV. Applications.** — Les résultats que nous venons de signaler très sommairement ont de très nombreuses applications : nous indiquerons les principales sans nous y arrêter, sauf en ce qui concerne les manomètres que nous devons étudier plus complètement, à cause de leurs applications fréquentes, notamment en physiologie.

L'horizontalité de la surface d'un liquide en un point donné du globe est utilisée dans le niveau d'eau.

L'existence des pressions sur les parois oblige à faire choix d'un vase assez résistant pour ne pas être déformé ou rompu sous leur influence.

Elle explique le mouvement que prennent, lorsqu'ils sont libres de se mouvoir, les vases remplis de liquide dans la paroi latérale desquels on pratique des ouvertures (tourniquet hydraulique, turbines).

Le principe de l'égalité de transmission des pressions sert de base à la presse hydraulique.

L'existence de la poussée (principe d'Archimède) donne l'explication d'un grand nombre de faits, tels notamment que la sustentation des animaux marins au sein de l'eau, l'emploi des navires et bateaux.

La mesure de la poussée donne un moyen de mesurer le volume d'un corps. On le pèse dans l'air, puis dans l'eau ou dans un autre liquide quelconque. Comme on a pour cette perte de poids  $R = v\delta$ , on voit que, en divisant la perte de poids par le poids spécifique du liquide, on a le volume cherché :  $v = \frac{R}{\delta}$ .

Une application très importante de l'existence de la poussée, c'est la mesure des densités, pour laquelle il existe diverses méthodes : méthode de la balance hydrostatique, méthode des aréomètres. (La méthode du flacon ne repose pas sur ce principe : il est la réalisation même des conditions qui définissent la densité.)

**LXVI. Manomètres.** — Les manomètres sont des appareils destinés à mesurer la pression exercée par un liquide ou un gaz : comme nous l'avons dit, il en existe des modèles qui reposent sur la variation de la pression au sein d'un liquide : ils sont appelés *manomètres à air libre*.

Sous sa forme la plus simple, un manomètre à air libre est formé d'un tube droit en cristal qui plonge à sa partie inférieure, par une tubulure qui l'entoure hermétiquement dans une cuvette contenant assez de mercure pour baigner l'extrémité du tube. Cette cuvette présente une autre tubulure munie d'un tube à robinet par lequel on relie l'appareil au réservoir contenant le fluide dont on veut mesurer la pression. Lorsque cette pression agit, le mercure s'élève dans le tube et l'équilibre existe lorsque la pression exercée par la colonne de mercure soulevée est égale

à la pression qui existe dans la cuvette. On lit la hauteur de cette colonne sur une échelle placée le long du tube; la connaissance de cette hauteur permet d'évaluer le poids du mercure qui presse sur une surface donnée, 1 centimètre carré, par exemple : on sait, en effet, d'après le poids spécifique du mercure, que chaque élévation verticale de la surface libre de 1 centimètre augmente la pression de 13<sup>gr</sup>,59. On évalue ainsi les pressions en poids par centimètre carré, ce qui est la véritable manière de les évaluer. Lorsqu'il n'est pas nécessaire de connaître la valeur absolue des pressions, mais seulement de les comparer entre elles, on se borne à indiquer la hauteur de mercure soulevé : les pressions sont, en effet, proportionnelles à ces hauteurs.

Lorsque les pressions à mesurer ne sont pas considérables, on emploie de préférence le manomètre à siphon composé d'un tube en U contenant du mercure dans la courbure qui est à la partie inférieure, le mercure s'élevant dans chaque branche à peu près à mi-hauteur. La pression est évaluée à chaque instant par la différence de niveau dans les deux branches.

Le plus souvent, la branche par laquelle se transmet la pression présente un renflement qui réduit considérablement les variations de niveau dans cette branche et peut même les rendre négligeables, si le diamètre est assez grand (fig. 17).

Le manomètre de Regnault (fig. 18), destiné aux expériences de précision, présente une disposition générale analogue à celle d'un manomètre à siphon ABCD auquel serait adapté un ajutage vertical à sa partie inférieure. A la jonction de cet ajutage avec le tube principal se trouve un robinet à trois voies R permettant d'établir la communication entre les trois tubes de toutes les manières possibles, comme on le voit dans les figures 1, 2, 3, 4. Les positions intermédiaires interceptent, au contraire, toute communication.

**LXVII.** — Sous le nom d'hémodynamomètres, les manomètres ont été employés pour mesurer la pression du sang dans le système circulatoire d'un animal. A cet effet, on coupe une artère, par exemple, et on adapte son extrémité à un manomètre quelconque ; pour transmettre la pres-

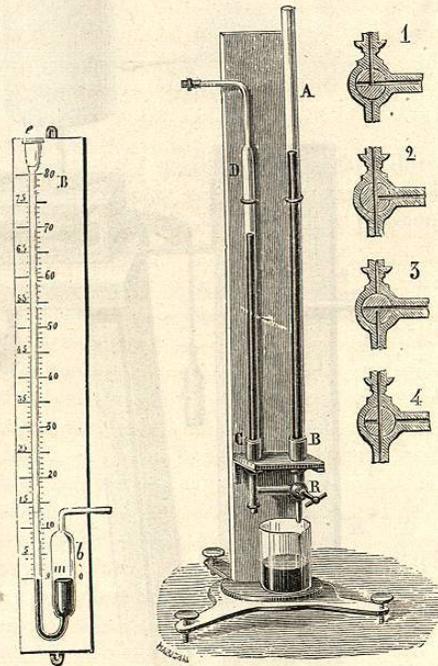


Fig. 17.

Fig. 18.

sion au mercure et empêcher la coagulation du sang, on a rempli l'appareil au-dessus du mercure à l'aide d'une dissolution alcaline.

Il est aisé de comprendre qu'il soit possible, à l'aide d'un flotteur

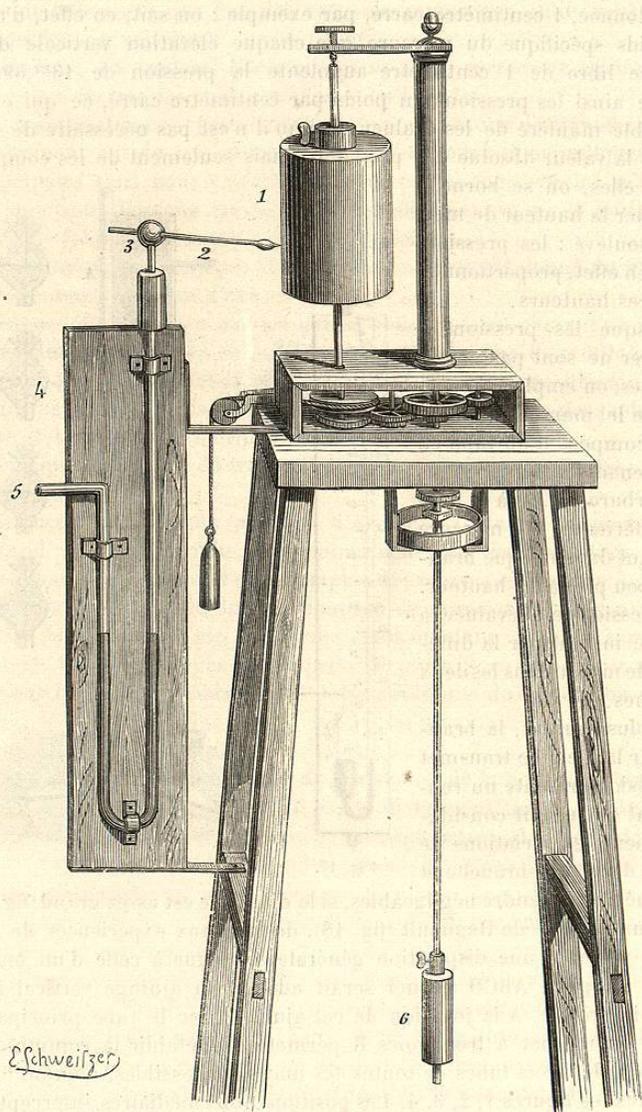


Fig. 19.

reposant sur le mercure dans la branche ouverte, d'enregistrer sur un cylindre tournant les variations de pression. Telle est la disposition générale du kymographion de Ludwig (fig. 19).

Lorsqu'on emploie pour mesurer la tension sanguine un appareil, tel par exemple que le cardiomètre de Claude Bernard (fig. 20) qui n'est qu'une modification de forme du manomètre à cuvette ABCD, on voit que la surface du mercure oscille constamment : c'est que, en effet, la pression du sang varie à chaque instant, à cause de l'action des battements du cœur. Il est difficile d'évaluer alors cette pression avec quelque exactitude. Pour obtenir avec facilité la valeur de la pression moyenne, M. Marey emploie le même appareil dans lequel seulement le tube vertical C'D' présente un étranglement à la base; la résistance produite par cet étranglement suffit pour arrêter les oscillations et maintenir invariable la surface libre.

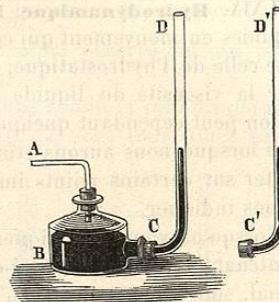


Fig. 20.

LXVIII. **Manomètres différentiels.** — Dans quelques circonstances, il est seulement nécessaire de mesurer la différence de deux pressions

d'elles. Il suffit alors de prendre un manomètre à siphon et de réunir chacune des branches avec un des réservoirs dans lesquels existent les pressions à comparer : la différence de niveau des surfaces libres dans les deux branches mesure la différence de pression cherchée.

Lorsqu'on veut effectuer une mesure de ce genre avec une très grande précision, on emploie le manomètre différentiel de Kretz (fig. 21). Il est composé d'un long tube en U dont les deux branches sont terminées supérieurement par deux larges réservoirs A et B; chacun de ceux-ci porte un tube à robinet par lesquels on établit la communication avec les réservoirs. On verse dans chacun de ces tubes un liquide dont la surface libre est dans le réservoir et la surface de séparation H dans l'un des tubes. Ces liquides qui ne doivent pas être miscibles et qui ne doivent pas agir chimiquement l'un sur l'autre ont des poids spécifiques très peu différents.

La surface de séparation H se déplace dès qu'il se manifeste une différence de pression entre A et B, et les déplacements de cette surface H sont très grands pour de petites différences de pression. On démontre, en effet, que, H et H' étant les deux pressions,  $\delta$  et  $\delta'$  les poids spécifiques des deux liquides et  $z$  le déplacement de la surface de séparation, on a sensiblement :

$$z = \frac{H - H'}{\delta - \delta'}$$

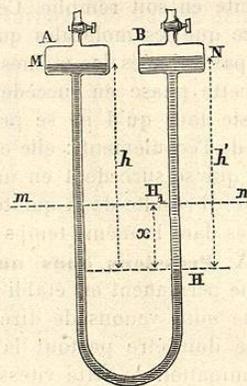


Fig. 21.

Pour une valeur donnée de  $H - H'$ ,  $z$  sera très grand si  $\delta - \delta'$  est très petit.

**LXIX. Hydrodynamique. Écoulement des liquides.** — L'étude des liquides en mouvement qui constitue l'*hydrodynamique* est moins simple que celle de l'hydrostatique, parce que les effets produits sont modifiés par la viscosité du liquide et par le frottement des parois, éléments qu'on peut cependant quelquefois négliger dans la pratique. Ce ne sera que lorsque nous aurons étudié ces éléments que nous pourrons compléter sur certains points importants les données sommaires que nous allons indiquer.

Lorsqu'on vient à pratiquer une ouverture dans une paroi d'un vase contenant un liquide, celui-ci s'écoule soit dans l'air, soit dans un canal, soit dans un tuyau qu'il remplit.

Le mouvement qui se produit alors doit être divisé en deux phases : pendant la première, qui constitue le *régime variable*, et qui dure plus ou moins longtemps suivant les circonstances, le liquide part du repos pour atteindre une certaine vitesse; si, en outre, l'écoulement se fait dans un canal ou une conduite qui étaient vides au début, il faut que la capacité en soit remplie. Cette phase de l'écoulement est caractérisée par ce que les molécules qui se succèdent en un point déterminé ne sont pas animées des mêmes vitesses.

A cette phase en succède une autre, celle du *régime permanent* qui persiste tant qu'il ne se produit aucun changement dans les conditions de l'écoulement : elle est caractérisée par ce que toutes les molécules qui se succèdent en un point donné quelconque y ont la même vitesse. Il résulte de là que toutes les sections du filet liquide sont traversées dans le même temps par la même quantité de liquide.

**LXX. Pressions dans un liquide en mouvement.** — Lorsque le régime permanent est établi dans une conduite cylindrique, il résulte de ce que nous venons de dire que, les sections étant partout égales, la vitesse doit être partout la même : le mouvement est uniforme. La détermination de cette vitesse dépend, comme nous l'avons indiqué, de données complexes et nous n'y insisterons pas maintenant.

Mais nous pouvons étudier la pression qui existe aux différents points, pression qui ne dépend pas de ces données.

On évalue ces pressions à l'aide de *tubes piézométriques*, tubes verticaux implantés en divers points de la conduite et d'assez petit diamètre pour que l'existence de leur orifice dans celle-ci ne modifie pas sensiblement les conditions de la paroi. Le liquide qui s'écoule dans la conduite s'élève dans ces tubes et la hauteur de la colonne soulevée mesure la pression au point où le tube débouche dans la conduite.

Si la conduite est obturée, si le liquide ne coule pas, les surfaces libres s'élèveront au même niveau dans tous les tubes, d'après le principe des vases communicants. Mais, dès que l'écoulement commence, le niveau des diverses surfaces libres s'abaisse dans tous les tubes : la pression en chaque point de la conduite est donc plus faible pendant l'écoulement que lorsque le liquide était au repos. De plus, l'abaissement

est d'autant plus grand qu'on considère un point plus éloigné de l'origine de la conduite : la position de ce niveau reste d'ailleurs invariable pendant toute la durée du régime permanent.

L'abaissement du niveau piézométrique ainsi observé en un point constitue ce qu'on appelle la *perte de charge*.

L'expérience montre que, dans le cas d'une conduite cylindrique rectiligne, les niveaux piézométriques  $c, d, e$  (fig. 22) sont tous situés sur la ligne qui joint le point A de la surface libre situé verticalement au-dessus de l'origine B de la conduite à l'extrémité F de celle-ci, si l'on suppose que la conduite débouche librement à l'atmosphère.

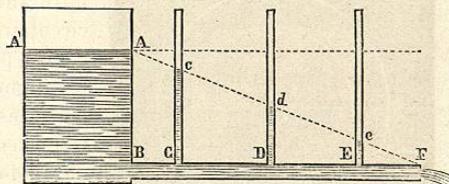


Fig. 22.

On conclut de là que les pertes de charge aux différents points de la conduite sont proportionnelles aux distances de ces points, au point de départ de la conduite.

Si la conduite n'est pas cylindrique les surfaces du liquide dans les tubes piézométriques ne sont pas en ligne droite; la variation de charge n'est pas régulière.

Si, par exemple, le tube BF (fig. 23) est composé de deux parties cylindriques séparées par un étranglement M, pour chaque partie cylindrique les points sont séparément en ligne droite, mais il y a une brusque dénivellation à l'endroit de l'étranglement, dénivellation qui a pour effet de relever le niveau piézométrique avant cet étranglement et de l'abaisser après.

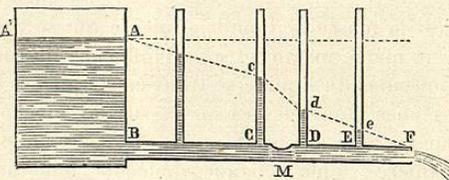


Fig. 23.

La variation suit des lois moins simples, s'il s'agit d'une conduite qui ne soit pas cylindrique. Nous ne nous y arrêtons pas.

**LXXI. Des ondes à la surface des liquides.** — Parmi les questions qui se rapportent au mouvement des liquides, il est intéressant de signaler les déformations qui se propagent à la surface des liquides dont la masse peut être, d'ailleurs, au repos. Ce n'est pas que ces phénomènes présentent, à notre point de vue, des applications directes, mais ils sont faciles à vérifier, et leur connaissance peut servir, par comparaison, à comprendre d'autres mouvements vibratoires dont nous aurons à parler plus tard et dont l'observation directe est moins simple ou même peut être impossible (voir ACOUSTIQUE, OPTIQUE PHYSIQUE).

Tout le monde connaît l'effet produit par un corps tombant dans un liquide tranquille; on distingue à la surface un anneau circulaire ayant pour centre le point ébranlé et qui se meut de telle sorte que son rayon va sans cesse en croissant, sans que son centre soit changé. En obser-

vant plus attentivement, on reconnaît que cet anneau circulaire correspond à une élévation et à une dépression du liquide se succédant immédiatement. La figure 24 montre une coupe du liquide par un plan vertical passant par le centre du cercle; on distingue la partie surélevée en *a*, la partie déprimée en *b*, le niveau du liquide étant *cde*. C'est cet anneau circulaire que nous appelons une *onde*. Une onde peut, d'ailleurs, ne pas avoir la forme circulaire : notamment une partie d'onde circulaire considérée loin de son centre peut être considérée comme rectiligne. Dans cette figure, comme dans les suivantes, nous représenterons en plan l'onde par deux traits parallèles, le trait fort correspondant à la partie la plus élevée, le trait faible à la partie la plus abaissée.

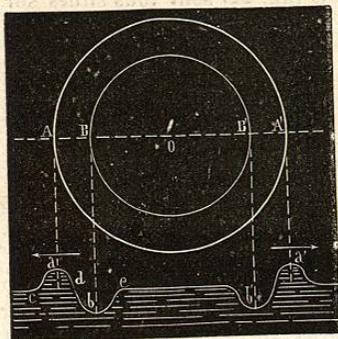


Fig. 24.

c'est la masse de liquide soulevée qui se déplace. Il faut concevoir que, à un même instant et sous l'influence de causes quelconques, certaines molécules du liquide se trouvent dérangées de leur position d'équilibre, les unes étant élevées au-dessus du niveau de la surface libre, tandis que les autres sont abaissées au-dessous. Cet état ne peut exister d'une manière stable, chaque molécule tendant à reprendre sa position d'équilibre; mais le retour à cette position ne s'effectue pas sans que les molécules voisines ne soient influencées, si bien que les molécules qui touchaient la partie élevée se trouvent élevées à leur tour, tandis que les molécules qui constituaient cette partie élevée dépassant leur position d'équilibre se trouvent abaissées au-dessous de la surface libre : le liquide présente donc encore une élévation et une dépression, mais non pas au même endroit, et ce ne sont pas non plus les mêmes molécules qui les constituent, chacune des molécules n'étant animée que d'un mouvement oscillatoire vertical, ou à peu près; l'onde n'est que l'expression d'un état de la surface, et son transport signifie seulement que des parties différentes de celle-ci prennent successivement ce même état.

On peut avoir une idée assez nette de ce qu'on appelle une onde, en observant l'effet d'un coup de vent sur un champ de blé : on voit les épis s'abaisser successivement et se relever, et quoiqu'ils ne se déplacent certainement pas latéralement, l'apparence est la même que si une vague courait à la surface du champ.

LXXII. — Lorsque le liquide ne présente pas une surface indéfinie, mais qu'il est limité par une paroi verticale, un phénomène nouveau se produit, la réflexion de l'onde. Supposons une onde plane *ABab* (fig. 25) rencontrant sous un certain angle une paroi plane; elle ne disparaît pas par le fait de cette rencontre, mais donne naissance à une onde

plane *BbCc* ayant une direction différente et dont la vitesse a aussi une direction différente. La nouvelle onde est déterminée complètement en disant qu'elle est symétrique de la partie *BbC'c'* de l'onde primitive, qui serait de l'autre côté de l'obstacle si le liquide s'était propagé au delà de cette ligne, la surface qui fait obstacle n'existant pas.

On voit immédiatement que les deux ondes font des angles égaux avec la surface et qu'elles sont aussi également inclinées sur la normale à la surface.

Si l'onde incidente qui rencontre la paroi plane *MN* (fig. 26) est circulaire elle est transformée par la réflexion en une autre onde circulaire qui se comporte absolument comme si elle émanait d'un point *C'* qui est le symétrique par rapport à l'obstacle du véritable centre d'ébranlement, du centre *C* de l'onde incidente.

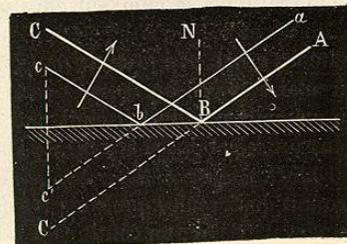


Fig. 25.

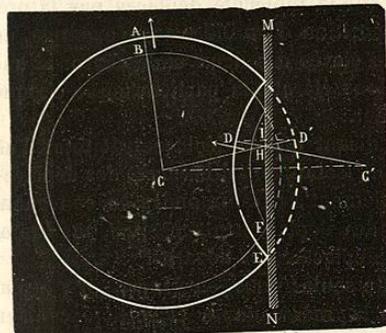


Fig. 26.

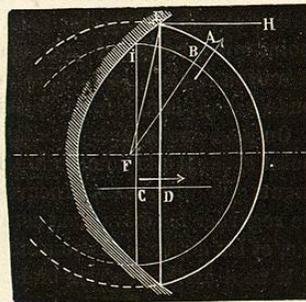


Fig. 27.

Si la paroi n'est pas plane, les résultats sont différents : la règle est cependant la même pour chaque élément, mais le changement de direction de ces éléments modifie les résultats. Nous signalerons seulement les cas simples suivants dont nous trouverons plus tard des analogues.

Toute onde circulaire dont le centre est au foyer *F* (fig. 27) d'une parabole se transforme, par la réflexion, en une onde rectiligne se mouvant dans le même sens, et perpendiculaire à l'axe de la parabole.

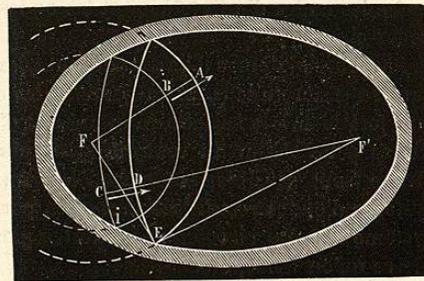


Fig. 28.

Toute onde circulaire dont le centre est à l'un des foyers F d'une ellipse (fig. 28) se transforme, par la réflexion sur cette courbe en une autre onde circulaire ayant son centre à l'autre foyer F' et dont le rayon décroît jusqu'à zéro.

Il faut encore signaler un cas important de réflexion : considérons une onde rectiligne se mouvant dans un canal étroit qui débouche dans une pièce d'eau indéfinie dans tous les sens. Lorsque l'onde arrive à l'extrémité du canal, elle produit dans la pièce d'eau une onde sensiblement circulaire ayant son centre à cette extrémité et dont le rayon croît. Mais en même temps il se produit une autre onde qui revient dans le canal dans un sens opposé à celui de l'onde incidente.

**LXXIII. Superposition des ondes.** — Si dans une nappe indéfinie on produit deux ondes quelconques qui viennent à se rencontrer, elles continuent d'exister; on continuera à les distinguer l'une et l'autre comme si, pour ainsi dire, elles se traversaient sans se modifier. A l'endroit où elles se coupent à un instant donné, on observe que chaque molécule du liquide occupe précisément la même position que si les deux ondes au lieu d'exister simultanément y fussent parvenues successivement et que l'effet de la seconde se fût produit sur la molécule déplacée par la première et non encore revenue à sa position d'équilibre : par exemple, un point qui correspond aux sommets élevés des deux ondes éprouve une élévation égale à la somme des deux élévations partielles que chaque onde lui eût communiquée isolément.

On peut énoncer ce résultat en disant que le déplacement total d'un point est égal à la somme algébrique (somme ou différence) des déplacements que lui eussent procurés isolément ces deux ondes en convenant de regarder les élévations comme des déplacements positifs, par exemple, et les dépressions comme des déplacements négatifs.

Il peut arriver qu'une onde existe seule; mais, en général, il y a plusieurs ondes successives qui ont la même cause et se déplacent en passant successivement aussi par les mêmes variations : c'est là ce qu'on appelle un *système d'ondes*. Les ondes d'un même système ne peuvent jamais se rencontrer directement; il peut y avoir rencontre entre les ondes d'un système et les ondes provenant de la réflexion de celles-ci.

Plusieurs systèmes d'ondes peuvent coexister à la surface d'un liquide, sans se gêner et sans qu'on cesse de les distinguer tous. C'est ce qui se voit fort bien à la surface de la mer ou d'un lac : outre les vagues produites par l'action du vent, qui au moins à une certaine distance du rivage sont sensiblement parallèles, on distingue simultanément le système d'ondes rectilignes produites par le mouvement d'un navire, le système d'ondes circulaires produites par un oiseau qui pêche, par une pierre qu'on lance, etc.

**LXXIV. Interférences des ondes.** — Considérons le cas de deux ondes égales arrivant en un même point, parallèlement, de manière que, à un instant, la partie élevée de la 1<sup>re</sup> se trouve à la place occupée par la partie abaissée de la 2<sup>e</sup> et inversement. Conformément à ce que nous

avons dit de la superposition des ondes, les effets produits par l'élévation d'une onde et l'abaissement de l'autre se neutraliseront exactement et à cet instant la surface du liquide deviendra plane : on dit qu'il y a *interférence* des deux ondes.

C'est, par exemple, le cas de deux ondes égales AB, CD (fig. 29, I), marchant en sens contraire : au moment où elles se croisent (II) il y a interférence, et pendant un instant la surface du liquide devient plane. Mais les ondes ne sont pas détruites, elles continuent à se mouvoir et se manifestent de nouveau après leur croisement (III). Des effets de ce genre se produisent dans un système

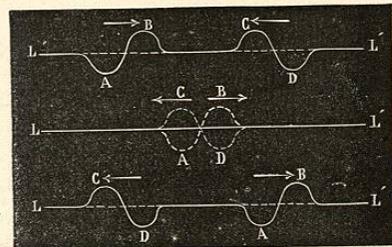


Fig. 29.

d'ondes se déplaçant dans un canal; ce système, parvenant à l'extrémité du canal, donne naissance à des ondes réfléchies : celles-ci marchent en sens contraire des ondes du premier système et les croisent en produisant l'effet que nous venons d'indiquer.

Considérons deux systèmes d'ondes égales se déplaçant dans le même sens dans deux canaux parallèles et venant déboucher dans un canal unique. Dans ce dernier il y aura, en général, un système unique d'ondes dû à la superposition des systèmes précédents et marchant dans le même sens. Mais si les deux systèmes sont tels qu'en arrivant dans le canal commun la dépression des ondes d'un système coïncide avec l'élévation des ondes de l'autre système, l'interférence se produira absolument et dans le canal commun, il n'y aura plus d'ondes : les deux systèmes se seront détruits réciproquement. Il suffira, pour voir reparaitre des ondes dans ce canal, d'empêcher l'arrivée de l'un des systèmes : l'autre alors continuera à se propager seul.