

port de 1 à 15,6, ce qu'on exprime en disant que les *poids spécifiques* de l'eau et du mercure sont dans le rapport de 1 à 15,6 ; pour que les poids de ces deux colonnes de même base soient égaux, il faut donc que les hauteurs HL et HK soient dans le rapport de 15,6 à 1, c'est-à-dire *en raison inverse des poids spécifiques*.

L'expérience peut être réalisée au moyen d'un tube en forme d'U (fig. 66), dans lequel on verse d'abord du mercure, puis de l'eau dans

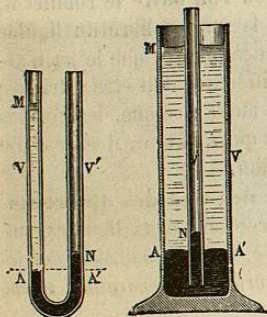


Fig. 66.

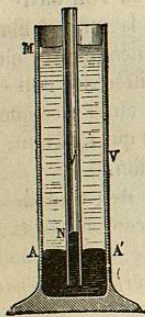


Fig. 67.

l'une des branches verticales. On constate que la hauteur AM de cette eau est égale à treize fois et demie la hauteur AN du mercure au-dessus de la surface de séparation des deux liquides.

La figure 67 représente une autre disposition de la même expérience. Une éprouvette V contenant une petite quantité de mercure, on y introduit un tube de verre, ouvert à ses deux extrémités, et l'on verse de l'eau au-dessus du mercure, à l'extérieur du tube. On a ici, en réalité, deux vases communicants, savoir : d'une part, la capacité extérieure au tube ; d'autre

part, la capacité intérieure du tube ; on constate encore que les hauteurs AM et AN de l'eau et du mercure, au-dessus de la surface de séparation AA', sont dans le rapport de 15,6 à 1.

85. Puits ordinaires, puits artésiens, jets d'eau. — C'est dans les principes des vases communicants, qu'on trouve l'explication des particularités que présentent les puits ordinaires ou les puits artésiens.

Parmi les couches qui composent le sol, les unes, formées de sables ou de fragments pierreux, laissent pénétrer les eaux qui arrivent à leur surface ; les autres, au contraire, formées de marnes ou d'argiles compactes, sont à peu près imperméables à l'eau, qui coule à leur surface sans y pénétrer d'une manière sensible. — Or, concevons qu'une masse d'eau un peu considérable A (fig. 68), comme celle d'un lac ou d'un étang, pénètre dans le sol au travers de couches sablonneuses ou pierreuses, et parvienne ainsi jusque dans l'intervalle de deux couches argileuses imperméables : elle y forme alors une nappe souterraine, comme celle qui est représentée en MN. Si l'on vient à pratiquer des puits en des points du sol tels que C ou D, situés à des niveaux *plus élevés* que A, et qu'on fasse pénétrer ces puits jusqu'à la nappe MN, l'eau s'y élève jusqu'à ce qu'elle atteigne, dans chacun d'eux, au niveau de la surface horizontale A. Ce sont là les *puits ordinaires* : on garnit les parois de maçonnerie, afin d'empêcher l'eau de se perdre dans les terrains perméables au travers des-

quels les puits pénètrent. — On est parfois tenté de s'étonner qu'on puisse retirer d'un puits des quantités d'eau considérables, sans que le niveau de l'eau s'abaisse sensiblement. Cela tient à ce que l'eau qu'on en retire est remplacée sans cesse par celle qui arrive de la

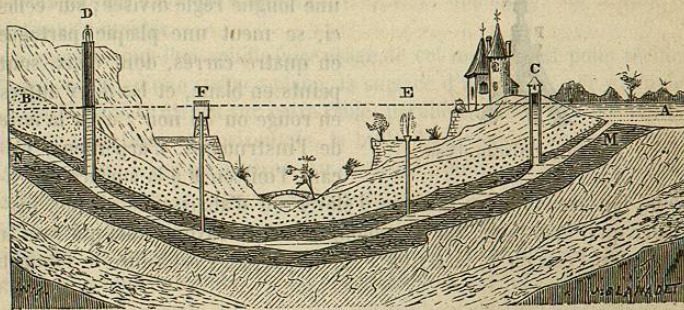


Fig. 68. — Puits ordinaires et puits artésiens.

masse A, et à ce que celle-ci est alimentée par des ruisseaux ou par les pluies. C'est à peine si le niveau de l'eau éprouve quelques variations aux époques de grande sécheresse.

Si les points du sol où l'on pratique les puits sont situés *plus bas* que le niveau A, en E ou en F par exemple, l'eau jaillit au-dessus du sol, à une hauteur plus ou moins grande, selon la différence de niveau. — Le plus ordinairement, on adapte alors, à l'ouverture du puits, un tube surmonté d'un réservoir F, dans lequel l'eau s'élève, et duquel on peut faire partir des conduits pour la distribuer aux environs. — Ces puits portent le nom de *puits artésiens*, parce que c'est dans l'Artois qu'ont été creusés les premiers qui aient été pratiqués en France.

On se place dans des conditions semblables, pour obtenir des *jets d'eau* artificiels. Un réservoir étant disposé dans un lieu élevé, on le fait communiquer avec des conduits souterrains, qui vont s'ouvrir à la surface de bassins situés plus bas. La direction du jet est déterminée par celle de l'orifice de sortie : pour que le jet s'élève le plus haut possible, on l'incline légèrement sur la verticale.

84. Niveau d'eau. — L'instrument connu, dans l'arpentage, sous le nom *niveau d'eau*, est fondé sur les mêmes principes. Il se compose d'un tube de métal (fig. 69), qui est porté par un trépied, et dont les deux extrémités coudées se continuent avec les parois de deux fioles de verre sans fond, M et N. On y verse de l'eau, et l'on fait en sorte que les surfaces du liquide soient visibles dans les deux fioles ; le plan MN, qui passe par ces deux surfaces, est horizontal (81).

Quand l'arpenteur veut connaître la différence de niveau de deux points B et B' d'un terrain, il place l'instrument en un point intermédiaire A (fig. 70), et fait dresser verticalement en B, par un aide, une longue règle divisée; sur celle-ci, se meut une plaque partagée en quatre carrés, dont deux sont peints en blanc, et les deux autres en rouge ou en noir : c'est la mire de l'instrument. L'arpenteur, plaçant l'œil en M à la surface du liquide, fait avec la main le signe d'élever ou d'abaisser la plaque, jusqu'à ce qu'il aperçoive, sur le prolongement du rayon visuel qui rase la surface de l'eau en N, le centre P de la plaque, c'est-à-dire le sommet

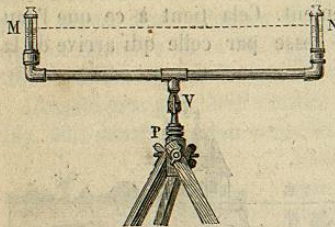


Fig. 69. — Niveau d'eau.

commun aux quatre carrés, que la différence des couleurs rend facile à distinguer de loin. La position de la plaque une fois fixée, on note la hauteur BP mesurée sur la règle. — L'arpenteur fait alors transporter la mire au point B' (supposé à gauche, en dehors de la figure); il détermine de même la position du point P' qui se trouve dans le même plan horizontal que P, et la hauteur B'P' de ce point au-dessus du sol. — La différence des hauteurs BP et B'P' donne la différence de niveau des points B et B'.

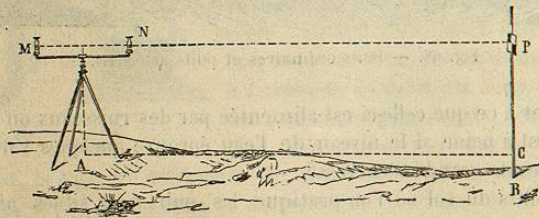


Fig. 70.

85. **Niveau à bulle d'air.** — On désigne sous le nom de *niveau à bulle d'air* un petit instrument (fig. 71) qui sert à vérifier l'horizontalité des lignes ou des surfaces sur lesquelles on le place.

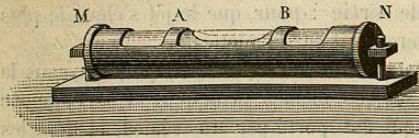


Fig. 71. — Niveau à bulle d'air.

Il consiste en un tube de verre légèrement convexe, dans lequel on a introduit de l'eau ou de l'alcool, en y laissant seulement un espace occupé par une grosse bulle d'air. Ce tube est con-

tenu dans une gaine de cuivre MN, qui est évidée de manière à laisser voir le tube dans la plus grande partie de sa longueur; le tout est fixé sur une plaque métallique. — La bulle d'air se place toujours au point le plus haut, et on a réglé l'instrument de manière que, si la plaque est bien horizontale, les deux extrémités de la bulle viennent correspondre à deux bandes transversales de cuivre, A, B, appliquées sur le tube et servant de repères.

Supposons que l'on veuille faire usage de cet instrument pour vérifier l'horizontalité d'une surface plane, la surface d'une table, par exemple. — On placera le niveau sur cette table, parallèlement à l'un des bords. Si cette direction est horizontale, la bulle d'air viendra se placer exactement entre les deux repères. Au contraire, pour peu que cette direction soit inclinée, la bulle se portera du côté le plus élevé, et l'on devra alors relever progressivement la table du côté opposé, au moyen de cales par exemple, jusqu'à ce que la bulle arrive entre les repères et s'y maintienne immobile. — Ce résultat étant atteint, on répétera la même opération pour une direction perpendiculaire à la précédente (*). — Lorsque le réglage aura été effectué pour ces deux directions, on sera certain que la surface de la table est horizontale.

II. — PRINCIPE D'ARCHIMÈDE.

86. **Principe d'Archimède.** — *Tout corps plongé dans un liquide éprouve une poussée, de bas en haut, égale en grandeur au poids du liquide déplacé.*

Ce principe peut se démontrer par le raisonnement suivant. — Considérons un liquide en équilibre, et supposons qu'une portion MN de ce liquide (fig. 72), vienne à se solidifier, sans changer ni de poids ni de volume; le corps solide ainsi formé demeurera en équilibre au milieu du liquide. Or, les forces qui le sollicitent sont, d'une part, son poids P, appliqué en son centre de gravité G; d'autre part, les pressions telles que p, p , que le liquide exerce normalement à chacun des éléments de la surface du corps. Puisque toutes ces forces se font équilibre, les pressions p ont une résultante, qui est égale et directement opposée au poids P. Or, toutes les pressions p con-

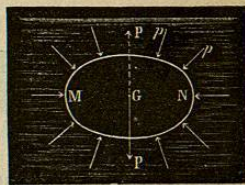


Fig. 72.

(*) On devra avoir soin, dans cette seconde opération, de ne pas changer ce qui aura été fait dans la première; c'est-à-dire que, s'il est nécessaire d'employer de nouvelles cales, elles ne devront être placées que sous les pieds auxquels on n'aura pas touché précédemment. S'il en était autrement, on devrait recommencer la première opération après la seconde.

serveront les mêmes valeurs, si l'on remplace ce solide idéal par un corps solide réel, de même forme, mais de nature quelconque : elles ont donc toujours une résultante, et cette résultante, que nous nommerons la *poussée*, est une force dirigée de bas en haut, égale en grandeur au poids de la masse liquide dont le corps tient la place, et passant par le centre de gravité de cette masse liquide elle-même.

87. **Vérification expérimentale.** — Pour vérifier le principe d'Archimède, on fait l'expérience suivante. — On prend deux cylindres, l'un plein D (fig. 75), l'autre creux C, travaillés de manière que le volume

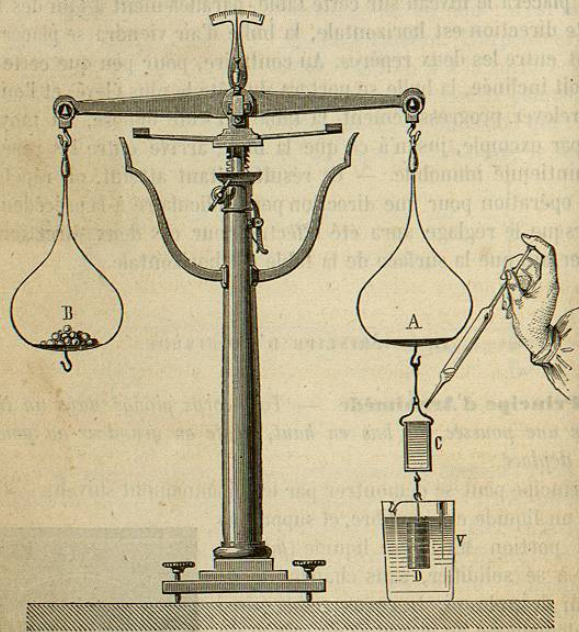


Fig. 75. — Vérification du principe d'Archimède.

du cylindre plein soit exactement égal à la capacité du cylindre creux (ce dont on peut s'assurer en constatant que le premier entre exactement dans le second). On suspend, sous l'un des plateaux A d'une balance hydrostatique (*), le cylindre creux, et, au-dessous de lui, le cylindre plein; puis, on fait équilibre à ce système au moyen d'une tare, placée dans l'autre plateau B. — Cela fait, on introduit au-dessous du cylindre D

(*) On appelle *balance hydrostatique* une balance comme celle que représente la figure 75, dont on peut faire monter ou descendre le fléau, au moyen d'une crémaillère contenue dans la colonne qui supporte l'instrument. Cette disposition est particulièrement commode pour introduire, dans l'eau ou dans un liquide quelconque, les corps que l'on a suspendus à l'un des plateaux.

un vase contenant de l'eau, et l'on fait en sorte que ce cylindre y plonge complètement. La poussée exercée par l'eau sur le cylindre D fait incliner la balance de l'autre côté. Mais on constate que, pour ramener le fléau à la position horizontale, il suffit de remplir d'eau le cylindre creux C; ce qui montre que l'on fait équilibre à la poussée, en ajoutant, du même côté, un poids d'eau égal à celui de l'eau déplacée.

88. **Poids apparent d'un corps complètement plongé dans un liquide.** — D'après le principe d'Archimède, un corps solide MN, plongé dans un liquide (fig. 74), est soumis : 1° à l'action de la poussée P, qui est une force verticale dirigée de bas en haut, égale en grandeur au poids de la partie du liquide dont ce corps tient la place, et appliquée au centre de gravité G de cette partie elle-même; 2° à l'action de son poids P', qui peut être considéré comme appliqué au centre de gravité G' du corps solide.

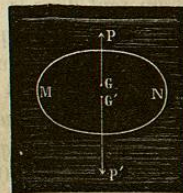


Fig. 74.

Supposons que le corps soit *homogène*, c'est-à-dire que, à des volumes égaux, pris en différents points de sa masse, correspondent toujours des poids égaux; alors, si le corps est complètement plongé, son centre de gravité G' coïncide avec le centre de gravité G du liquide déplacé; par suite, les deux forces P' et P, appliquées en un même point et directement opposées, ont une résultante égale à leur différence $P' - P$, et dirigée de haut en bas si cette différence est positive. Cette résultante est ce qu'on appelle le *poids apparent* du corps dans le liquide. — Si le corps n'est pas homogène, il s'oriente, sous l'action des forces P' et P, de manière que G' et G se placent sur une même verticale; dans cette position, les forces P' et P, ont encore une résultante, et, si P' est plus grand que P, le *poids apparent* du corps est encore une force $P' - P$, dirigée de haut en bas. — On dit quelquefois que le corps *perd une partie de son poids*, égale au poids du liquide déplacé : c'est là une locution peu correcte, mais dont le sens n'offre pas d'ambiguïté.

Si le poids P' du corps est égal au poids P du liquide déplacé, le poids apparent du corps est nul, c'est-à-dire qu'il se tient en équilibre de lui-même au milieu du liquide.

Enfin, si la poussée P est plus grande que le poids P' du corps, le poids apparent $P' - P$ est négatif, c'est-à-dire que le corps est sollicité par une force résultante qui tend à le faire mouvoir *de bas en haut* dans le liquide. C'est ce qu'on observe pour le liège, le bois, plongés dans l'eau; pour le fer plongé dans le mercure, etc. — Lorsqu'il en est ainsi, et que le liquide présente une surface libre, le mouvement ascendant du corps l'amène, comme nous allons le voir, à une position d'équilibre.

89. **Équilibre des corps flottants.** — Lorsqu'un corps, sollicité par une poussée plus grande que son poids, arrive à la surface libre du liquide dans lequel il est plongé, une portion de plus en plus grande de ce corps émerge successivement du liquide; par suite, la poussée acquiert des valeurs successivement décroissantes: il arrive donc un moment où la poussée devient égale au poids du corps, et peut lui faire équilibre. — L'expérience montre, en effet, que l'équilibre s'établit toujours; on dit alors que le corps *flotte* à la surface du liquide.

Si l'on désigne alors par p la valeur actuelle de la poussée, due à la partie plongée, on peut dire, une fois l'équilibre établi: 1° que la poussée p et le poids P' du corps sont appliqués en des points G et G' qui sont dans la direction même de ces forces, c'est-à-dire *sur une même verticale*; 2° que ces deux forces sont *égales* entre elles. — C'est surtout cette seconde remarque qu'il importe de retenir; elle peut s'énoncer comme il suit:

Toutes les fois qu'un corps flotte à la surface d'un liquide, son poids est égal à celui du liquide que déplace la portion plongée.

90. **Ludion.** — On réalise, au moyen du *ludion* (fig. 75), les conditions diverses dans lesquelles un corps solide descend, monte, ou se tient en équilibre dans un liquide. — Dans une éprouvette pleine d'eau, on a introduit une boule de verre creuse B, percée vers sa partie inférieure d'une petite ouverture capillaire (placée à gauche sur la figure); cette boule supporte une figurine d'émail, dont le poids a été réglé de façon que, la boule étant vide, le système ait un poids total moindre que celui de l'eau déplacée, et monte à la surface du liquide. Une membrane, ficelée sur le bord de l'éprouvette, permet d'exercer, avec le doigt, une pression sur la surface de l'eau; cette pression, se transmettant dans le liquide, fait pénétrer dans la boule une certaine quantité d'eau, qui comprime l'air intérieur, en sorte que le poids du système se trouve augmenté du poids de cette eau: dès que le poids total est devenu supérieur à la poussée, le ludion descend. — Si l'on vient à supprimer la pression, la force élastique de l'air chasse de la boule l'eau qui y était entrée, et le ludion remonte. — Enfin, on peut régler la pression de manière que la boule se tienne en équilibre au milieu du liquide, le poids total du système étant alors égal à la poussée.

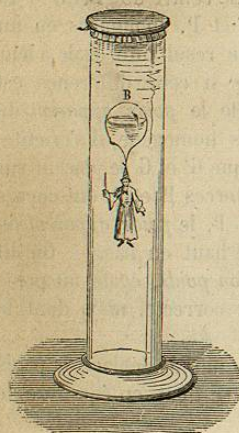


Fig. 75. — Ludion.

pression, la force élastique de l'air chasse de la boule l'eau qui y était entrée, et le ludion remonte. — Enfin, on peut régler la pression de manière que la boule se tienne en équilibre au milieu du liquide, le poids total du système étant alors égal à la poussée.

III. — CAPILLARITÉ.

91. **Phénomènes capillaires.** — On désigne sous le nom de *phénomènes capillaires*, des phénomènes qui paraissent en opposition avec les lois de l'équilibre des liquides, et qu'on observe particulièrement dans les tubes dont le diamètre est, jusqu'à un certain point, comparable à celui d'un cheveu.

Lorsqu'on plonge un tube de verre AB (fig. 76), d'un diamètre suffisamment petit, dans l'eau ou dans un liquide quelconque capable de mouiller le verre, on voit le liquide s'élever dans ce tube plus haut

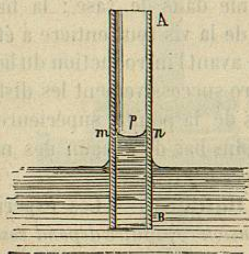


Fig. 76.

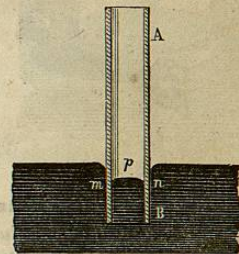


Fig. 77.

qu'à l'extérieur. La surface courbe mpn , dans le tube capillaire, forme alors ce qu'on appelle un *ménisque concave*.

Si l'on fait la même expérience avec du mercure, ou en général avec un liquide qui ne mouille pas le verre, ce liquide est déprimé à l'intérieur du tube, au-dessous du niveau extérieur (fig. 77); sa surface est alors un *ménisque convexe*.

On remarque, en outre, dans le premier cas, que le liquide se relève au contact des parois extérieures du tube; dans le second, qu'il se déprime dans le voisinage de ces parois.

Newton a indiqué les considérations qui permettent de faire disparaître le désaccord apparent entre les phénomènes capillaires et les lois de l'hydrostatique. La place en a donné une théorie mathématique, dont les conséquences ont été vérifiées par divers expérimentateurs. — Nous nous bornerons à indiquer les lois expérimentales de l'ascension ou de la dépression des liquides dans les espaces capillaires.

92. **Ascensions capillaires.** — Pour un même liquide, les hauteurs des colonnes soulevées, dans divers tubes capillaires, sont en raison inverse des diamètres de ces tubes.

Gay-Lussac a vérifié cette loi par l'expérience suivante. Un large vase V (fig. 78), contient le liquide sur lequel on opère; il repose sur

un plateau muni de vis calantes, qui permettent de rendre le bord du vase horizontal. Dans la plaque métallique AB sont assujettis des tubes capillaires, t, t', t'' , de différents diamètres. Les diamètres de ces tubes ont été préalablement mesurés, en pesant le mercure qui occupe dans le tube une longueur déterminée. — Pour mesurer les ascensions, on a assujetti dans la plaque AB une vis à deux points CC', dont la pointe inférieure C est amenée à l'affleurement de la partie plane de la surface liquide dans le vase : la hauteur verticale de la vis tout entière a été déterminée avant l'introduction du liquide. On mesure successivement les distances verticales de la pointe supérieure C au point le plus bas de chacun des ménisques m, m', m'' (*).

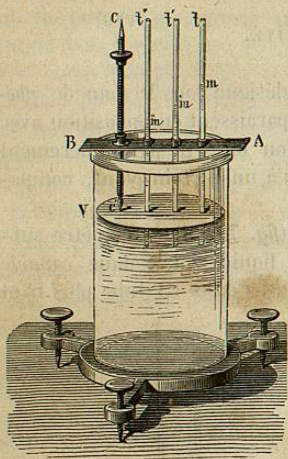


Fig. 78.

93. **Influence de la nature des liquides.** — Les expériences montrent que, dans un même tube, l'ascension capillaire dépend essentiellement de la nature du liquide. — Dans un tube de 1 millimètre de diamètre, par exemple, on trouve que l'eau s'élève à $50^{\text{mm}},7$; l'alcool, à $12^{\text{mm}},1$; l'éther, à $10^{\text{mm}},8$; le sulfure de carbone, à $10^{\text{mm}},2$.

(*) Ces diverses mesures s'effectuent à l'aide du cathétomètre, que nous décrirons sommairement ici, en raison du fréquent usage qu'on en fait pour mesurer la distance verticale de deux points, c'est-à-dire la distance des plans horizontaux qui passent par ces points.

Le cathétomètre (fig. 79 et 80) se compose essentiellement d'une lunette horizontale AB, mobile le long d'une colonne verticale MN, laquelle tourne librement elle-même autour d'un axe vertical. — Les figures 79 et 80 montrent deux vues d'un même instrument, prises de deux positions opposées : la colonne verticale MN a ici la forme d'un prisme triangulaire, qui porte une division en millimètres sur l'une de ses faces (fig. 80), et qui est traversé suivant son axe par une barre métallique : c'est sur cette barre que se fait la rotation, autour de la pointe de la vis R. — La lunette est portée par un chariot formé de deux pièces P, Q, qui sont liées entre elles par une vis g (fig. 80); en r , cette vis n'est qu'assujettie dans une sorte de collier; en s , le pas de vis tourne dans un écrou fixé à la pièce P. La pièce inférieure Q porte une vis de pression F (fig. 79) qui permet de la fixer solidement sur la colonne, et alors la vis g peut faire monter ou descendre la pièce P, de quantités aussi petites qu'on veut. — À l'intérieur de la lunette, au foyer de l'objectif, c'est-à-dire au point où viennent se former nettement les images des objets extérieurs, on a tendu en croix deux fils très fins, qui forment le réticule. — Trois vis calantes (dont deux sont visibles en V et V') permettent de faire en sorte que le pied soit bien horizontal, et, par suite, la colonne bien verticale. La vis e , en faisant basculer la pièce ab autour du point O, permet d'établir l'horizontalité de l'axe de la lunette, qu'on apprécie d'ailleurs avec le niveau à bulle d'air cd . Avant de faire une expérience, on commence par assurer toutes ces conditions, c'est-à-dire par régler l'instrument, opération assez délicate et dans le détail de laquelle nous n'entrerons pas.

Pour mesurer la distance verticale de deux points, on installe le cathétomètre à une

94. **Dépressions capillaires.** — Les dépressions capillaires sont soumises à des lois semblables. — Les expériences de vérification ont

distance telle que ces deux points puissent être distingués nettement dans la lunette, et l'on règle l'instrument. — On place alors la lunette de manière que le point de croisement des fils du réticule vienne coïncider exactement avec l'image du premier point; pour cela, on desserre d'abord la vis de pression F, et l'on transporte le chariot

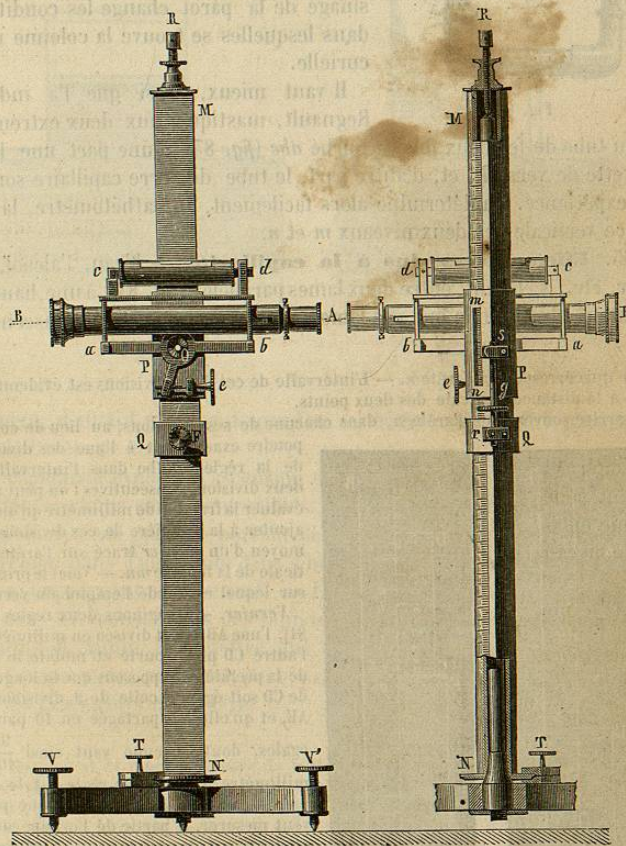


Fig. 79. — Cathétomètre.

Fig. 80.

tout entier le long de la règle, jusqu'à ce que la lunette soit arrivée à une position approchée : on fixe ensuite la pièce Q, en serrant la vis F, et l'on tourne la vis g dans un sens ou dans l'autre, de manière à faire monter ou descendre la pièce P, pour achever d'établir la coïncidence. On note alors la division de la règle qui correspond à l'arête inférieure n d'une petite fenêtre mn (fig. 80) pratiquée dans la pièce P. — On amène ensuite, de la même manière, le réticule à coïncider avec l'image du second point, en faisant tourner la colonne MN s'il est nécessaire, et l'on note encore la division de la

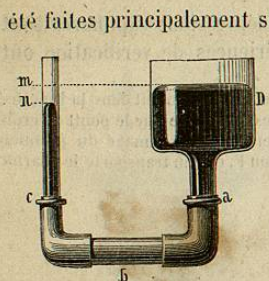


Fig. 83.

d'un tube de fer deux fois recourbé *abc* (fig. 83), d'une part une large cuvette de verre *D*, et, d'autre part, le tube de verre capillaire soumis à l'expérience. On détermine alors facilement, au cathétomètre, la distance verticale des deux niveaux *m* et *n*.

95. **Effets divers dus à la capillarité.** — L'eau, l'alcool, l'éther, etc., s'élèvent, entre deux lames parallèles (fig. 84), à une hauteur d'autant plus grande que ces lames sont plus rapprochées.

régle qui correspond à l'arête *n*. — L'intervalle de ces deux divisions est évidemment égal à la distance verticale des deux points.



Fig. 81.

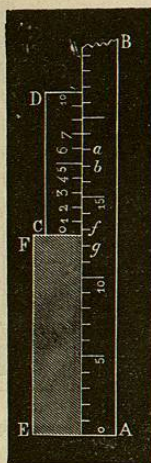


Fig. 82.

comme le représente la figure, cherchons, parmi les traits du vernier, quel est celui qui se trouve en regard de l'un des traits de la règle : supposons, par exemple, que ce soit le septième. Puisqu'une division de AB équivaut à 1 millimètre, et une division de CD à 0^m,9, il est clair que la distance des traits marqués 6 et *a* est de 0^m,1; celle des traits 5 et *b* est de 0^m,2...; enfin, la distance du zéro du vernier au trait *g* est de

est la moitié de ce qu'elle serait dans un tube d'un diamètre égal à l'écartement des lames.

Entre des lames de verre se touchant par un de leurs bords verticaux (fig. 85), le liquide s'élève, dans l'espace angulaire qu'elles com-

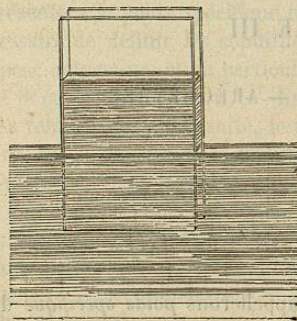


Fig. 84.

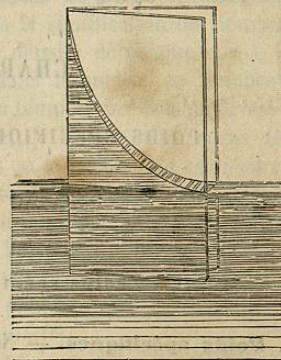


Fig. 85.

prennent, d'autant plus haut que l'on considère des points plus voisins de l'arête de contact.

La capillarité explique l'ascension des liquides dans les canaux très fins dont certains corps sont criblés. Un morceau de sucre ou de craie, plongé dans l'eau par une portion de sa surface, une mèche de coton qui trempe dans l'alcool ou dans l'huile, semblent aspirer le liquide, et s'en imprègnent rapidement. — La capillarité joue un rôle important dans les mouvements des liquides chez les végétaux; l'expérience a conduit M. Jamin à admettre que les forces capillaires, combinées avec l'évaporation, suffisent pour expliquer les principales particularités de l'ascension de la sève.

0^m,7. En général, le numéro d'ordre de la division du vernier qui coïncide avec un trait de la grande règle, donne la fraction additionnelle en dixièmes de millimètre.

Si l'on prenait un vernier dont la longueur totale fût égale à 49 millimètres et que l'on divisât cette longueur en 50 parties égales, on pourrait de même effectuer des mesures en cinquantièmes de millimètre. Il n'y a d'ailleurs aucun avantage à dépasser cette limite, parce que, eu égard à la largeur des traits eux-mêmes, les coïncidences paraîtraient réalisées simultanément pour plusieurs traits consécutifs du vernier et les traits de la règle.