tige t, le niveau du mercure dans la branche PQ vient affleurer au bord de la bague demeurée en H. — Donc la pression supportée par la surface du mercure dans la cuvette est la même dans les trois expériences,

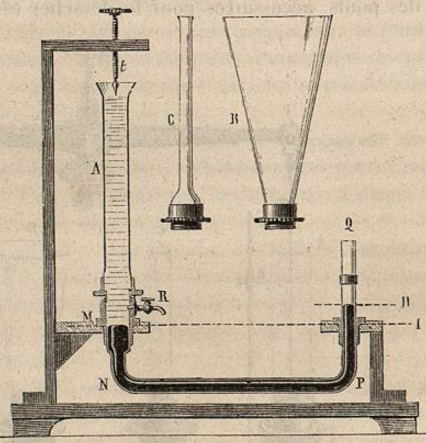

Fig. 71. — Appareil de Haldat.

malgré les formes différentes des vases auxquels cette surface sert successivement de fond.

84. Pressions sur les parois latérales. — L'existence des pressions sur les parois latérales peut se démontrer par l'expérience, en pratiquant des ouvertures dans les parois d'un vase : le liquide s'échappe, par chaque ouverture, en formant un jet qui est d'abord normal à la portion de paroi supprimée, et qui s'infléchit ensuite sous l'influence de la pesanteur. Les molécules liquides qui touchaient la paroi exerçaient donc contre elle une pression normale.

Pour évaluer cette pression, prenons, sur une paroi latérale d'un vase ABCD (*fig.* 72), un élément de surface *mn*, assez petit pour qu'on puisse toujours le considérer comme plan, et pour qu'on puisse regarder tous ses points comme étant à égale distance de la surface libre. Cet élément éprouve, de la part du liquide, une pression normale à sa surface, et égale à celle qu'il supporterait, si, venant à tourner autour de l'un de ses points, il se plaçait dans une position horizontale (73) ; cette pression est donc égale au poids d'une colonne cylindrique droite de liquide, ayant pour base *mn* et pour hauteur la distance de cet élément au plan de la surface libre.

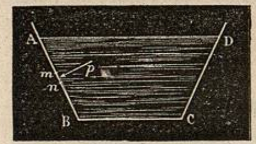

Fig. 72.

Si, au lieu d'un élément infiniment petit, on considère une portion

plane et finie de paroi latérale, chacun de ses éléments supporte une pression normale : toutes ces pressions ont donc *une résultante*, normale à la paroi, et *égale à leur somme*. — On démontre, en Mécanique, que cette résultante est égale au poids d'une colonne cylindrique droite de liquide, ayant pour base la portion de paroi considérée, et pour hauteur la distance de son centre de gravité au plan de la surface libre. Elle est appliquée en un point qu'on appelle le *centre de pression :* ce point est évidemment situé plus bas que le centre de gravité de la portion de paroi elle-même.

85. Pression de bas en haut, sur une portion horizontale de la paroi. — D'après ce qui précède, une paroi horizontale, en contact par sa face inférieure seule avec un liquide dont la surface libre est à un niveau plus élevé, doit éprouver une pression de bas en haut égale au poids d'une colonne de liquide ayant pour base cette surface et pour hauteur la hauteur même du liquide extérieur au-dessus d'elle. Pour le vérifier, on prend un large tube de verre, fermé à la partie inférieure par un disque plan *ab* (*fig.* 73) que l'on maintient d'abord au moyen d'un fil fixé en son centre. Si l'on enfonce ce tube verticalement dans l'eau, le disque éprouve de bas en haut une pression qui l'applique contre l'ouverture, car on peut abandonner le fil sans que le disque se détache. — Pour déterminer expérimentalement la valeur de cette pression, on versera de l'eau dans le tube, et l'on constatera que le disque se détache au moment où le niveau intérieur arrive dans le plan du niveau extérieur. Or, à ce moment, l'intérieur du tube constitue un vase sur le fond duquel s'exerce une pression que nous savons évaluer (81). La pression qui s'exerce de bas en haut sur *ab* lui est équivalente : elle est donc égale au poids d'une colonne de liquide ayant pour base *ab* et pour hauteur la distance de *ab* au niveau de la surface libre.

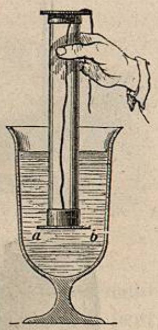

Fig. 73.

86. Pression sur l'ensemble de la paroi du vase. — Paradoxe hydrostatique. — Supposons que l'on porte successivement, sur l'un des plateaux d'une balance, trois vases semblables aux vases A, B, C (*fig.* 71), et contenant de l'eau jusqu'à une même hauteur; négligeons, pour plus de simplicité, les poids des vases eux-mêmes, dont il serait d'ailleurs facile de tenir compte. La pression qu'exerce le liquide, sur le fond qui repose sur le plateau de la balance, est la même pour chacun de ces trois vases, et cependant il est évident qu'il faudrait, pour leur faire équilibre, placer dans l'autre plateau de 'a balance des poids différents. — Cette apparente contradiction, connue sous le nom de *paradoxe hydrostatique*, disparaît quand on a égard à l'ensemble des pressions que le 'iquide exerce sur les parois.

Il est facile de voir, en effet, que les pressions p, exercées sur les différents éléments d'une paroi telle que AB (*fig.* 74), qui fait un angle obtus avec le fond, peuvent se décomposer chacune en deux forces, l'une horizontale f' et l'autre verticale f; les composantes verticales s'ajoutent à la pression exercée sur le fond, et se transmettent, par la paroi solide, au plateau de la balance. Le plateau supporte donc une pression plus grande que celle qui s'exerce directement sur le fond de ce vase. — Sur une paroi faisant un angle aigu avec

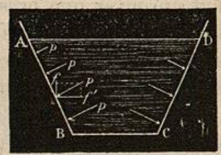

Fig. 74.

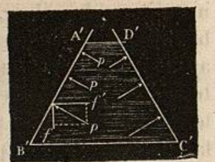

Fig. 75.

le fond, chaque pression élémentaire p (*fig.* 75) se décompose en une force horizontale f' et en une force verticale f dirigée en sens contraire de la pesanteur; donc la pression supportée par le plateau de la balance est la différence entre la pression supportée par le fond du vase et la résultante des forces f.

Fig. 76.
Expérience du crève-tonneau.

On complète cette explication, en Mécanique, en démontrant que, quelle que soit la forme du vase, toutes les pressions élémentaires supportées par l'ensemble des parois *ont une résultante unique, égale au poids du liquide contenu dans le vase.*

Une expérience due à Pascal montre, d'une manière frappante, l'influence qu'exerce la hauteur d'un liquide, sur la grandeur des pressions que supportent les parois de l'enveloppe qui le contient. — Un tonneau (*fig.* 76), dressé sur son fond, est rempli d'eau : on y assujettit un tube vertical, étroit, de plusieurs mètres de hauteur. Pour remplir ce tube, il suffit d'une petite quantité d'eau, et cependant, en raison de l'accroissement de hauteur du liquide, l'accroissement de pression sur chacune des douves du tonneau est tel, qu'on les voit éclater, et laisser échapper le liquide par tous leurs interstices.

87. **Tourniquet hydraulique.** — Considérons un vase ABCD (*fig.* 77), dont nous supposerons, pour plus de simplicité, les deux parois AB et

CD planes, verticales et parallèles. Prenons, sur l'une de ces parois, une portion mn pour base d'un cylindre droit; ce cylindre découpe sur la paroi CD une portion $m'n'$ égale à mn. Les pressions que le liquide exerce sur mn et sur $m'n'$ sont

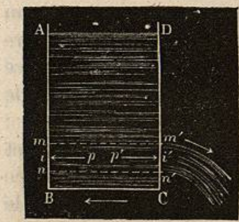

Fig. 77.

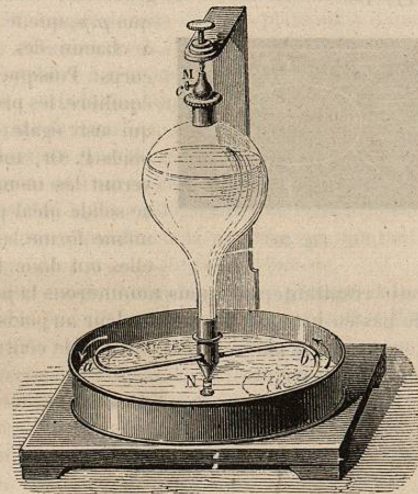

Fig. 78. — Tourniquet hydraulique.

deux forces p et p' égales et contraires, qui se font équilibre; mais si l'on vient à enlever la portion de paroi $m'n'$, la pression p' a pour effet de faire jaillir le liquide, tandis que la force p tend à imprimer au vase un mouvement de *recul*, en sens contraire de l'écoulement. — C'est ce que l'on peut constater, en plaçant le vase sur un petit chariot.

Le *tourniquet hydraulique* (*fig.* 78) est fondé sur le même principe. Un réservoir de verre MN, rempli d'eau, est disposé de manière à pouvoir tourner autour d'un axe vertical; il communique, à sa partie inférieure, avec un tube deux fois recourbé ab, qui a la forme d'un Z très allongé. — A l'instant où l'eau s'échappe par les extrémités de ce tube, l'appareil prend un mouvement de rotation, en sens contraire de l'écoulement. Ce mouvement est produit par les pressions que le liquide exerce sur les portions du tube opposées aux ouvertures.

III. — PRINCIPE D'ARCHIMÈDE.

88. **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.* 79) 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* conserveront 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.

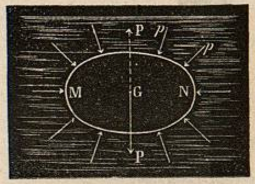

Fig. 79.

89. **Vérification expérimentale.** — Pour vérifier le principe

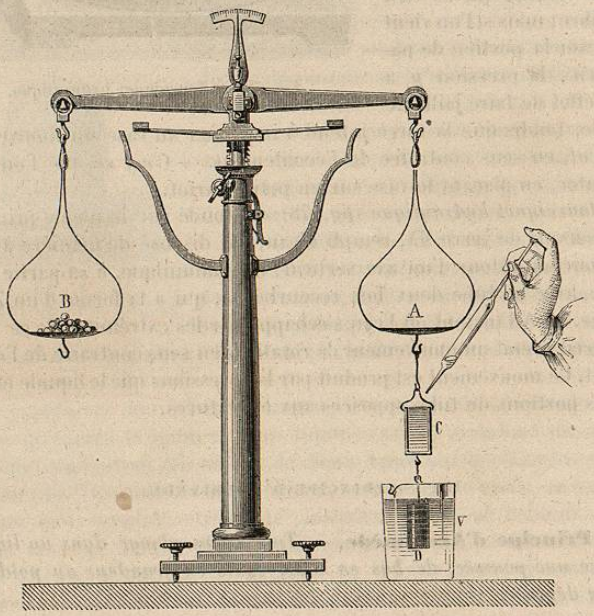

Fig. 80. — Vérification du principe d'Archimède.

d'Archimède, on fait l'expérience suivante. — On prend deux cylindres,

l'un plein D (*fig.* 80), l'autre creux C, travaillés de manière que le volume 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 un vase contenant de l'eau, et l'on fait en sorte que le cylyndre 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; on fait donc équilibre à la poussée, en ajoutant, du même côté, un poids d'eau *égal à celui de l'eau déplacée*.

90. **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.* 81), 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.

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.

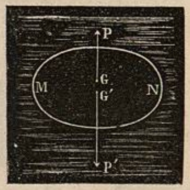

Fig. 81.

(*) On appelle *balance hydrostatique* une balance comme celle que représente la figure 80, 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.

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 liége, 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.

91. **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.

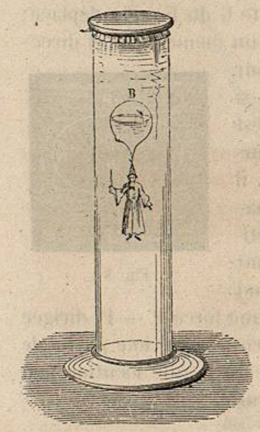
Fig. 82. — Ludion.

92. **Ludion.** — On réalise, au moyen du *ludion* (*fig.* 82), 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, fixée 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.

IV. — CAPILLARITÉ.

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

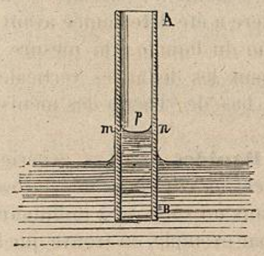

Fig. 83.

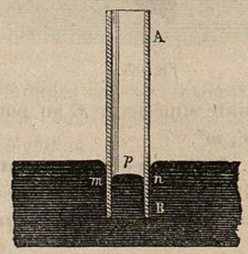

Fig. 84.

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.* 84) ; 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 ne 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. Laplace 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 tubes capillaires.

94. **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.* 85) 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 pointes 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''.

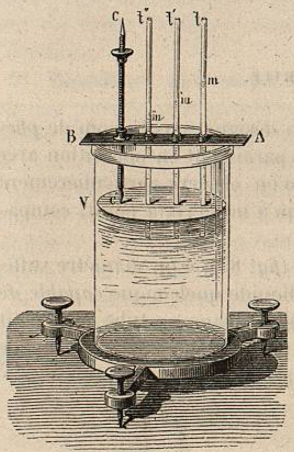

Fig. 85.

95. **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 30^{mm},7 ; l'alcool, à 12^{mm},1 ; l'éther, à 10^{mm},8 ; le sulfure de carbone, à 10^{mm},2.

96. **Dépressions capillaires.** — Les dépressions capillaires sont soumises à des lois semblables. — Les expériences de vérification ont été faites principalement sur le mercure. On mastique aux deux extrémités d'un tube de fer deux fois recourbé *abc* (*fig.* 86), d'une part une large cuvette de verre D, et, d'autre part, le tube de verre capillaire soumis à l'expérience. On introduit du mercure dans ces deux vases communicants, et on détermine alors facilement, au cathétomètre, la distance verticale des deux niveaux m et n.

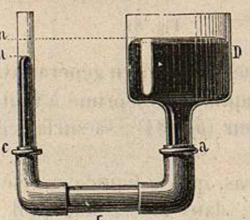

Fig. 86.

97. **Effets divers dus à la capillarité.** — L'eau, l'alcool, l'éther, etc., s'élèvent, entre deux lames parallèles (*fig.* 87), à une hauteur d'autant plus grande que ces lames sont plus rapprochées. L'ascension est *la moitié* de ce qu'elle serait dans un tube d'un diamètre égal à l'écartement des lames.

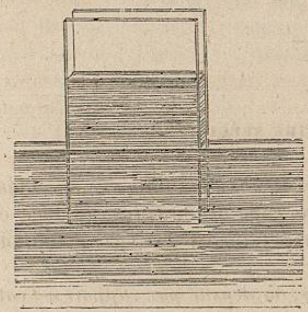
Fig. 87.

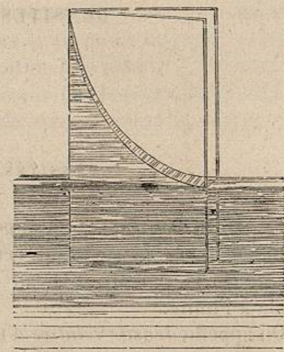
Fig. 88.

Entre des lames de verre se touchant par un de leurs bords verticaux (*fig.* 88), le liquide s'élève, dans l'espace angulaire qu'elles comprennent, 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 des corps poreux. — Elle joue un rôle important, comme l'a montré Jamin, dans les mouvements de la sève chez les végétaux.