

CHAPITRE VII

Suite des moteurs physiques. Eau.

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR L'EAU. — LOIS GÉNÉRALES DE L'HYDROSTATIQUE ET DE L'HYDRODYNAMIQUE. — DE L'EAU COMME MOTEUR. — DES ROUES HYDRAULIQUES. — ROUES À AUBES, À PERCUSSION OU EN DESSOUS. ROUES À AUGETS, À PRESSION OU EN DESSUS. — ROUES DE CÔTÉ. — ROUE PONCELET, OU À AUBES COURBES. — TURBINE. — DANAÏDE. MACHINE À COLONNE D'EAU. — PRESSE HYDRAULIQUE. — BÉLIER HYDRAULIQUE — POMPES. — VIS D'ARCHIMÈDE. — NORIA. CHAPELETS. — ROUE À GODETS.

§ 1. — Considérations générales sur l'eau.

La science de l'hydraulique se divise en trois parties :

- l'hydrostatique, ou la connaissance des lois de l'équilibre de l'eau ;
- l'hydrodynamique, ou la connaissance des lois du mouvement de l'eau ;
- l'hydraulique proprement dite, ou la connaissance des effets de l'eau comme puissance motrice, et des machines qui sont mues par elle ou servent à la mouvoir.

L'eau est un des fluides le plus répandus dans la nature et l'un de ceux, en petit nombre qui, sous nos yeux et par l'action des lois naturelles qui nous sont le plus familières, passe à l'état solide ou à l'état gazeux, sous les noms de glace et de vapeur d'eau.

Dans ces deux modifications de son état liquide, l'eau augmente de volume ; cette augmentation n'est pas très sensible lorsque l'eau se congèle, néanmoins il en résulte une force mécanique considérable. Ainsi, des canons de fer, remplis d'eau et bouchés à leur extrémité avec une grande solidité, puis exposés à l'action du froid, ont été trouvés rompus par l'effort de dilatation de la glace. Ce n'est pas à une autre cause qu'il faut attribuer la rupture des pierres soumises à l'action du froid. Cette rupture tient à ce que, ayant pénétré dans l'intérieur de ces pierres, soit par les fibres

naturelles de leurs lits, soit par de petites fentes accidentelles, l'eau agrandit ces fentes et les étend à la totalité de la pierre, par l'effort intérieur de dilatation qu'elle y exerce en se congelant.

Puisque l'eau, en passant à l'état de glace, augmente de volume, la glace est donc, à volume égal, plus légère que l'eau liquide. C'est pour cela que les glaces viennent à la surface de l'eau, et cette loi naturelle évite ainsi à la navigation les dangers auxquels elle serait exposée, en hiver, si la glace se trouvait sous l'eau. Par suite de cette loi d'ailleurs, nos cours d'eau se trouvent rapidement débarrassés des glaces qui les encombraient et qu'ils charrient jusqu'à la mer où s'achève leur fusion, sans danger pour la navigation.

Quant à l'augmentation de volume que prend l'eau en passant à l'état de vapeur, nous en avons dit un mot dans le chapitre précédent : à poids égal, le volume de vapeur est 1,700 fois plus considérable que celui de l'eau. Cela seul donne idée de la puissance mécanique qui peut résulter du passage de l'eau à l'état de vapeur, à condition, bien entendu, comme nous l'avons expliqué à l'article de la chaleur, qu'après avoir produit cette augmentation considérable de volume par la chaleur, on puisse produire une contraction ou condensation égale par le froid.

L'eau a son maximum de densité, c'est-à-dire son maximum de poids sous le minimum de volume, à quatre degrés centigrades au-dessus de zéro. On sait que pour la mesure habituelle des degrés de chaleur de l'eau et des autres liquides, on prend pour terme ordinaire de comparaison la température de la glace fondante, et celle de l'eau bouillante, sous la pression atmosphérique ordinaire, c'est-à-dire d'une colonne de mesure de 0,76 m. La température de la glace fondante est zéro, celle de l'eau bouillante est 80 ou 100, selon le nombre de divisions que l'on adopte. Une boule de verre, surmontée d'un petit tube creux où se trouve du mercure et qu'on a vidée d'air, est plongée dans la glace fondante, et l'on marque sur le tube de verre la hauteur du mercure, puis on la plonge dans l'eau bouillante. La chaleur fait augmenter le volume du mercure, il monte dans le tube, et l'on marque le point où il s'arrête. Entre ces deux points extrêmes, les anciens physiciens marquaient 80 divisions ou degrés, la nouvelle physique en marque 100, et l'instrument ainsi gradué s'appelle thermomètre centigrade.

L'autre s'appelle généralement thermomètre Réaumur. Les thermomètres servent à indiquer la température de l'air ; comme celle de l'eau ou des autres fluides, leur utilité s'étend depuis le point où le mercure se gèle, c'est-à-dire 33 degrés sous zéro, jusqu'à 150 degrés au plus. Au-delà de ce terme, la chaleur se mesure par d'autres instruments.

A 4 degrés au-dessous de zéro, le mètre cube d'eau, nous l'avons déjà dit, pèse 1 000 kg. Le kilogramme d'eau a un volume d'un décimètre cube, à cette température ; à 50 degrés, le mètre cube d'eau pèse 987 kg et à 100 degrés, 957 kg.

L'incompressibilité des liquides, et particulièrement de l'eau, par une action mécanique quelconque, a été longtemps regardée comme une propriété qui les distinguait des autres corps solides ou gazeux ; il est aujourd'hui démontré que

Planche IX - Eau - Roues hydrauliques

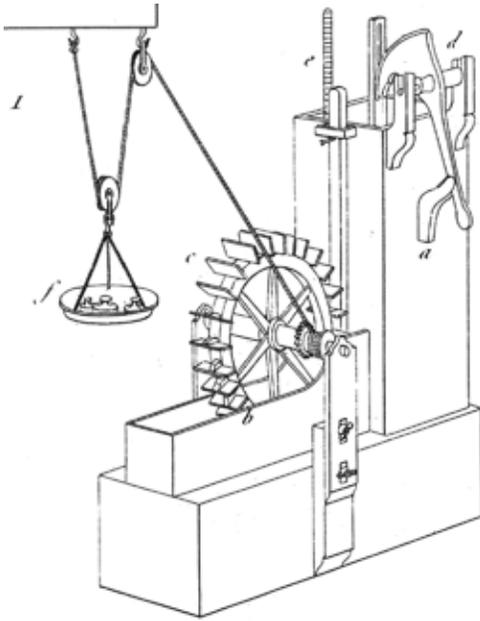


Fig. 9-1.

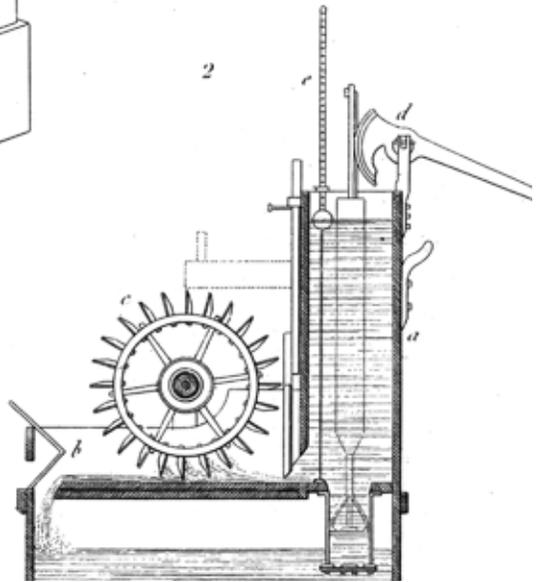


Fig. 9-2.

Fig. 9-3.

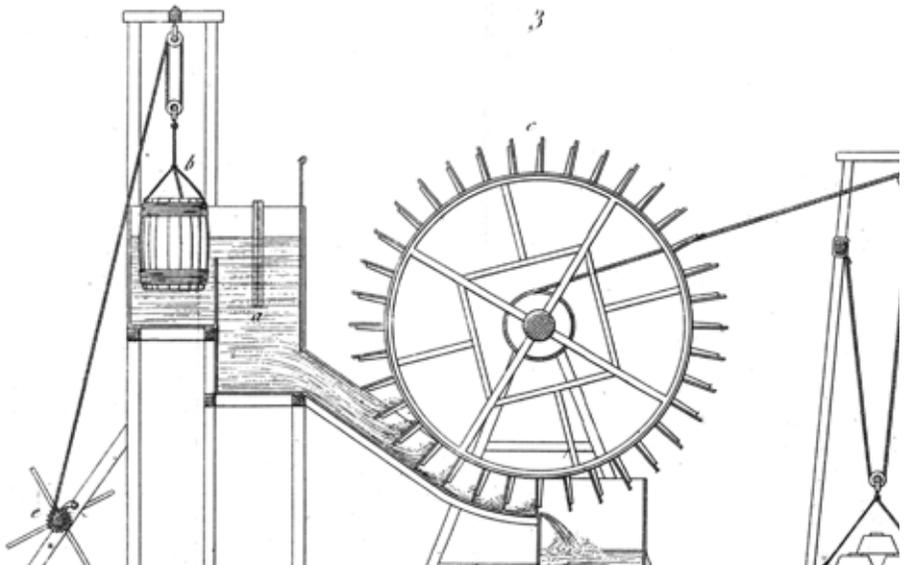


Planche IX - Eau - Roues hydrauliques

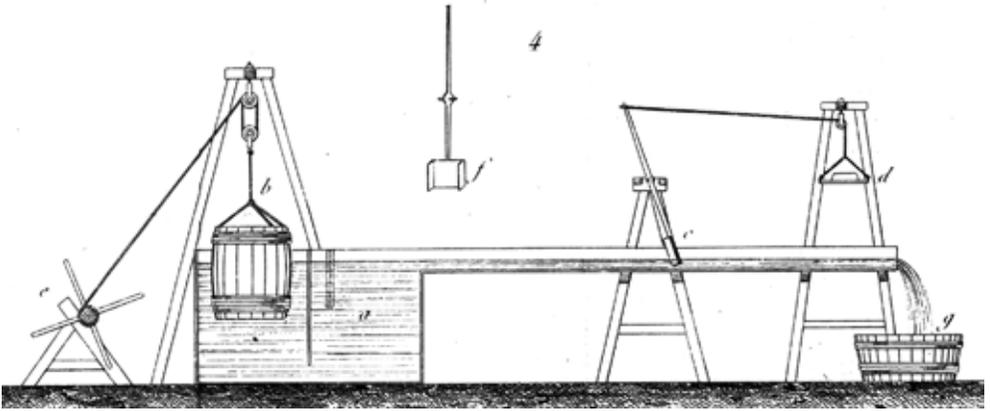


Fig. 9-4.

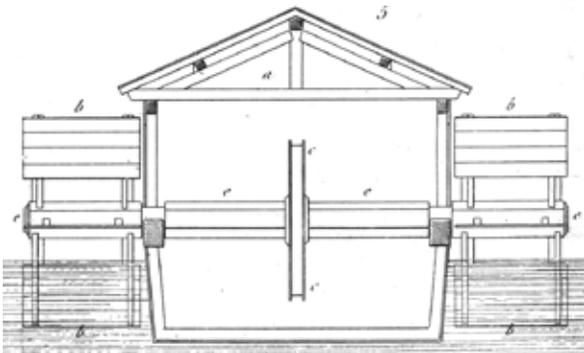


Fig. 9-5.

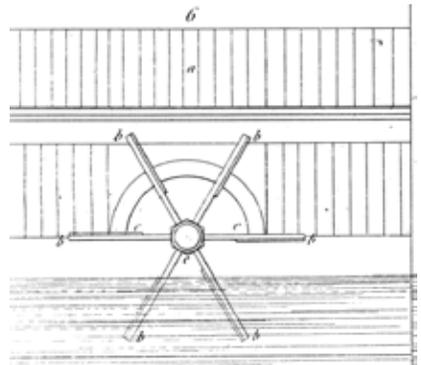


Fig. 9-6.

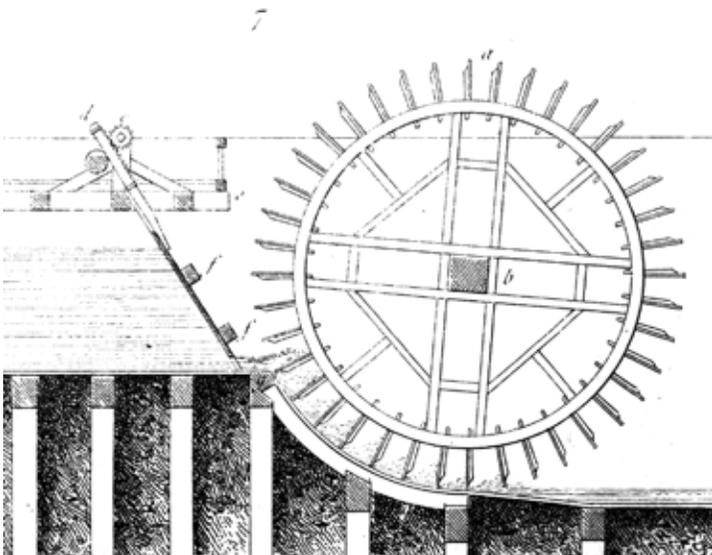


Fig. 9-7.

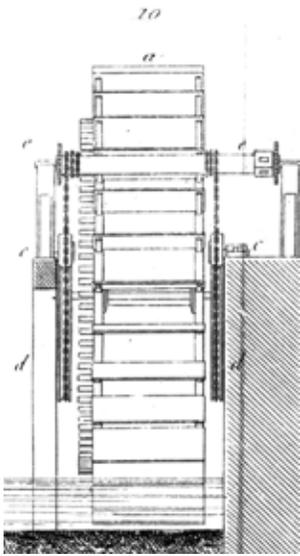


Fig. 9-10.

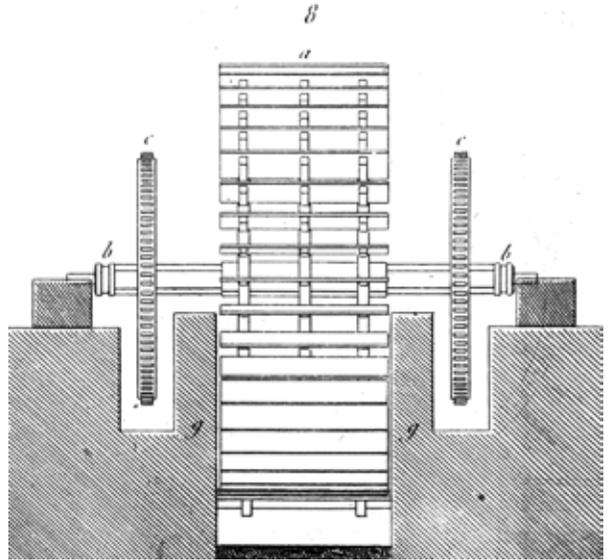


Fig. 9-8.

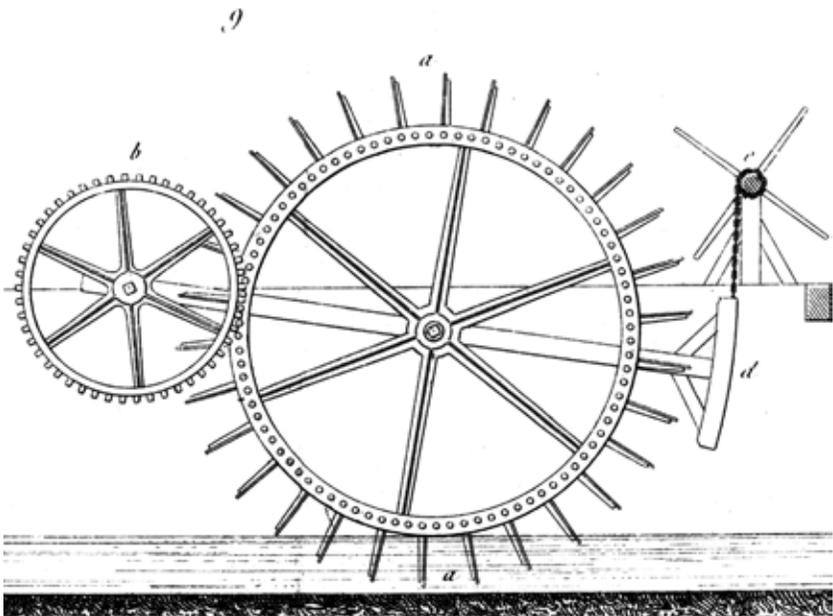


Fig. 9-9.

l'eau et les autres fluides sont compressibles, mais dans une très faible proportion. Sous la pression d'une atmosphère ou d'une action mécanique représentant la même pression qu'une colonne de mercure de 0,76 m de hauteur, l'eau éprouve sans changer de température une contraction de quarante cinq millièmes de son volume. La compressibilité du mercure sous la même pression est d'un millionième de son volume.

§ 2. - Lois générales de l'hydrostatique et de l'hydrodynamique.

Principes généraux d'hydrostatique

L'hydrostatique, dans son état actuel, repose sur les trois principes suivants :

- 1°) Les parties d'un liquide les moins pressées sont chassées par celles qui le sont davantage, et chaque partie est toujours pressée par le poids de la colonne qui lui répond verticalement.
- 2°) Tout ce qui est pressé par un fluide, l'est toujours suivant la verticale qui passe par son centre de gravité.
- 3°) Toute pression appliquée en un point de la surface d'un liquide se transmet également à tous les autres points du liquide.

Les deux premiers principes sont connus depuis deux mille ans, Archimède les a consignés dans ses ouvrages, et expliquait par eux la flottaison des corps à la surface de l'eau, et la diminution de poids qu'ils éprouvent, quand on les plonge dans ce liquide.

Le caractère essentiel d'un corps fluide, c'est la facilité avec laquelle ses molécules peuvent se déplacer et prendre la position d'équilibre, c'est-à-dire celle où toutes les forces auxquelles elles sont soumises sont égales. Ainsi, on remarque que partout où une masse d'eau se trouve libre, elle prend immédiatement à sa surface la ligne de niveau ou la ligne horizontale. Ce phénomène suffit seul à révéler les lois fondamentales de l'hydrostatique ; si l'eau n'est à l'état d'équilibre que lorsque sa surface, par tous les points où elle est libre, se met de niveau, c'est qu'aucune de ses molécules ne pourrait dépasser la ligne de niveau, sans soumettre toutes celles qui l'environnent à une certaine pression qui occasionnerait un certain mouvement. Aucune autre explication ne peut être donnée de cette propriété essentielle des liquides de *chercher constamment le niveau*, et le principe de *l'égalité de pression en tous sens* peut seul expliquer ce phénomène si important.

Si un vaisseau plein d'eau, clos de toutes parts, dit Pascal dans son *Traité de l'équilibre des liqueurs*, a deux ouvertures, l'une centuple de l'autre, en mettant à chacune un piston qui lui soit juste, un homme, poussant le petit piston, égalera la force de 100 hommes qui pousseront celui qui est plus large, et en surmontera 99.

Et quelque proportion qu'aient ces ouvertures, si les forces qu'on mettra sur ces pistons sont comme les ouvertures, elles seront en équilibre.

Et l'on doit admirer qu'il se rencontre en cette machine nouvelle cet ordre constant qui se trouve en toutes les anciennes, savoir : le levier, le tour, la vis sans

fin, etc., qui est que le chemin est augmenté en même proportion que la force. Car, il est visible que, comme une de ces ouvertures est centuple de l'autre, si l'homme qui pousse le petit piston l'enfonçait d'un pouce, il ne repousserait l'autre que de la centième partie seulement ; car, comme cette impulsion (pression) se fait à cause de la continuité de l'eau de l'un des pistons à l'autre, ce qui fait que l'on ne peut le mouvoir sans presser l'autre, il est visible que, quand le petit piston s'est mû d'un pouce, l'eau qu'il a poussée, poussant l'autre piston, comme elle trouve son ouverture cent fois plus large, elle n'y occupe que la centième partie de la hauteur ; de sorte que le chemin du petit piston est au chemin du grand piston, comme la largeur de celui-ci est à la largeur de celui-là, comme la force du second est à celle du premier, ce que l'on peut prendre même pour la vraie cause de cet effet, étant clair que c'est la même chose de faire faire un pouce de chemin à cent livres d'eau que de faire faire cent pouces de chemin à une livre d'eau, et qu'ainsi, lorsqu'une livre d'eau est tellement ajustée avec cent livres d'eau que les cent livres ne puissent remuer d'un pouce, qu'elles ne fassent remuer la livre de cent pouces, il faut qu'elles demeurent en équilibre, une livre ayant autant de force pour faire faire un pouce de chemin à cent livres, que cent livres pour faire faire cent pouces à une livre.

On peut ajouter, pour plus grand éclaircissement, que l'eau est également pressée sous ces deux pistons, car si l'un a cent fois plus de poids que l'autre, aussi en revanche il touche cent fois plus de parties, et ainsi chacune l'est également : donc toutes doivent être au repos, parce qu'il n'y a pas plus de raison pour que l'une cède que l'autre, de sorte que si un vaisseau plein d'eau n'a qu'une seule ouverture large d'un pouce, par exemple, où l'on mette un piston chargé d'un poids d'une livre, ce poids fait effort contre toutes les parties du vase généralement, à cause de la continuité et de la fluidité de l'eau, mais pour déterminer combien chaque partie supporte, en voici la règle. Chaque partie large d'un pouce, comme l'ouverture, supporte autant que si elle était pressée par le poids d'une livre (sans compter le poids de l'eau dont je ne parle pas ici, car je ne parle que du poids du piston), parce que le poids d'une livre presse le piston qui est à l'ouverture, et chaque portion du vaisseau, qui est plus ou moins grande, supporte précisément plus ou moins en raison de la grandeur, soit que cette portion soit vis-à-vis de l'ouverture, ou à côté, ou loin, ou près, car la continuité et la fluidité de l'eau rendent toutes ces choses égales et indifférentes, de sorte qu'il faut que la matière dont le vaisseau est fait ait assez de résistance en toutes ses parties pour soutenir tous ces efforts.

Si la résistance est moindre en quelqu'une, elle crève; si elle est plus grande, il en fournit ce qui est nécessaire, et le reste demeure inutile en cette occasion, tellement que si on fait une ouverture nouvelle à ce vaisseau il faudra, pour arrêter l'eau qui en jaillirait, une force égale à la résistance que cette partie devrait avoir, c'est-à-dire une force qui soit à celle d'une livre, comme l'ouverture faite par la rupture du vase est, quant à sa surface par rapport à la surface du piston, qui est un pouce.

Nous verrons plus loin la belle application que Pascal a faite de ces principes exposés par lui, avec une clarté et une méthode si remarquables, dans le morceau qu'on vient de lire.

Au lieu de supposer que la pression soit exercée sur le liquide renfermé dans un vase, par un piston agissant sur une surface d'un pouce carré, supposons la pression exercée par une colonne d'eau renfermée dans un tube. Dans ce cas, il se produit un phénomène bien digne d'attention ; la pression, exercée sur le fond du vase et celle qui est exercée sur les parois, ne dépend pas de la grandeur du tube en surface,

mais en hauteur. Que la colonne d'eau ait en surface deux pouces carrés ou dix, ou un seul, à égalité de hauteur de l'eau dans ces divers cas, la pression sur le fond ou sur les parois sera la même ; mais si, dans le tube le plus petit, on met une colonne d'eau plus haute, elle exercera une pression supérieure à celle du tube le plus large, où la colonne d'eau serait moins haute et dont cependant le volume serait plus considérable.

Ce phénomène s'explique en combinant le principe de l'égalité de pression en tous sens avec le premier principe que nous avons énoncé plus haut, savoir, que dans un liquide chaque partie est pressée par le poids de la colonne qui lui répond verticalement.

Ce principe résulte de l'action de la pesanteur. Chaque molécule d'eau est soumise à cette action qui s'exerce, comme nous l'avons dit, verticalement ; ainsi une molécule d'eau pèse sur celle qui la suit dans la direction verticale, celle-ci sur la suivante, et ainsi de suite. Cela n'est pas particulier à l'eau, en ce sens que dans tous les corps, chaque molécule pèse aussi sur celle qui lui est subordonnée, dans la direction verticale. Mais, dans les corps solides, ce phénomène n'est pas apparent, et on n'a pas à en tenir compte⁽¹⁹⁾ ; dans l'eau, au contraire, sa fluidité et en même temps sa continuité laissent au phénomène de la pesanteur son action plus libre, en telle sorte qu'elle devient sensible, et que le praticien rencontre à chaque pas cette propriété, et doit la faire entrer dans ses calculs.

Voici les lois principales, ou les faits les plus essentiels à connaître, qui résultent de ces propriétés fondamentales des fluides, et que l'on comprendra sans difficulté, si l'on s'est bien exactement rendu compte de ce qui précède.

La pression exercée sur le fond d'un vase rempli d'eau et horizontal est égale à la surface de ce fond, multipliée par la hauteur de l'eau. Supposons trois vases de formes analogues à celles des solides AB, CD, EF (fig. 3-11 p. 43), dont la surface inférieure est égale, mais dont l'un a sa surface supérieure plus grande que le fond, l'autre, sa surface supérieure égale à son fond, et l'autre, sa surface supérieure réduite à un point, la hauteur de ces trois vases étant d'ailleurs la même. Dans la position où ils sont représentés, remplissons-les d'eau : la quantité d'eau tenant dans chaque vase sera fort différente, et cependant les trois fonds éprouveront la même pression, car la pression est égale à la surface du fond multipliée par la hauteur, et dans les trois vases ces deux quantités sont les mêmes.

La pression que supporte le fond d'un vase ne dépendant que de la surface de ce fond, et de la hauteur de l'eau, on comprend qu'avec une très petite quantité d'eau il soit possible d'exercer une pression énorme sur ce fond. Dans le vase EF, la pression sur le fond du vase est déjà très grande, par rapport au volume d'eau.

Supposons une caisse cubique ayant intérieurement un mètre de côté ; elle contiendra un mètre cube d'eau, et le fond du vase supportera une pression

(19) Dans les corps solides, l'action de la pesanteur s'exerce, pour ainsi dire, en commun, à cause de la force de cohésion qui réunit leurs molécules. De là, l'importance du centre de gravité dans les corps solides, puisque c'est en ce point que chacune des molécules vient réunir sa force de pesanteur.

égale à 1 000 kg. Maintenant sur le haut de la caisse ajustons un tube carré ayant intérieurement un centimètre carré, et supposons que ce tube ait 0,50 m de haut. Il aura une contenance de 500 centimètres cubes et si nous le remplissons d'eau, le poids de cette eau sera de 500 grammes, ou 0,5 kg. Ainsi le vase entier contiendra 1000,5 kg d'eau, et par la forme donnée au vase, la pression sera égale à 1 mètre carré, multiplié par 1,50 m, soit $1,50 \text{ m}^3$, soit 1 500 kg. En un mot, la hauteur a été augmentée de moitié, la pression l'a été de même, quoique le poids total ne l'ait été que de $\frac{1}{2000}$.

On démontre par le calcul autant que par l'expérience que la pression sur les parois verticales est la moitié de celle qui s'exerce sur le fond dans les vases cubiques, et qu'en général en multipliant la surface de la paroi verticale par la moitié de la hauteur de l'eau dans le vase, on a l'expression de la pression exercée contre cette paroi. Quant à la pression sur des parois inclinées, elle s'obtient en multipliant leur surface par la distance de leur centre de gravité à la surface supérieure de l'eau.

La pression de chaque portion de liquide contre les parois verticales se fait toujours dans une direction horizontale et perpendiculaire à chaque point de la paroi, car c'est dans cette direction que le liquide sort, lorsqu'on a pratiqué une ouverture latérale quelconque.

Les lois d'hydrostatique que nous venons de faire connaître peuvent se résumer comme il suit :

- La pression de chaque portion de liquide contre la paroi est proportionnelle à l'étendue de la surface sur laquelle elle s'exerce et à la distance moyenne du niveau de l'eau.
- La pression des portions inférieures du liquide est plus grande que celle des portions supérieures. Cette pression est proportionnelle à la hauteur d'eau qui porte sur la portion que l'on considère.

Ainsi, quand un liquide contenu dans un vase fermé de toutes parts est soumis en outre à une pression venant d'un piston, ou de toute autre cause, il s'exerce contre ses parois deux sortes de pressions. L'une est due à la pesanteur des molécules du liquide, et varie d'un point à un autre du vase, elle croît dans le sens vertical, L'autre, constante sur tous les points, provient de la pression exercée à la surface, et est transmise également à toutes les parois. Ces deux pressions s'ajoutent à chaque point pour former la pression totale qu'il est facile de calculer d'après ce que nous avons dit plus haut. Il importe de bien distinguer ces deux sortes de pressions dont l'une existe dans tous les cas, comme résultat de la loi universelle de pesanteur, et dont l'autre varie comme les forces applicables à des surfaces liquides.

Un corps plus léger que l'eau, plongé dans ce liquide, remonte et vient flotter à sa surface. Une partie de ce corps reste cependant à un niveau inférieur à celui de l'eau, et bientôt l'équilibre s'établit ainsi.

Or, les colonnes verticales d'eau qui sont au-dessous du corps flottant sont plus basses que les colonnes verticales d'eau qui l'entourent, et cependant toutes ces colonnes sont en équilibre. En vertu du principe de l'égalité de pression en tous sens,

il faut donc conclure que, le corps qui demeure sur l'eau en équilibre, après en avoir déplacé une certaine portion, n'a pas fait autre chose que de substituer au-dessus des colonnes inférieures un poids précisément égal à celui qu'elles supportaient auparavant, et par conséquent cette quantité d'eau déplacée donne exactement la mesure du poids de ce corps.

Un corps plus lourd que l'eau s'enfonce dans l'eau et y déplace une quantité d'eau égale à son volume, par conséquent la force qui le pousse de bas en haut est précisément égale au poids d'un volume d'eau égal au volume de ce corps. C'est sur ce principe qu'est fondée la recherche de la pesanteur spécifique des corps, dont nous avons parlé page 38.

M. Christian donne un exemple fort instructif de cette poussée de haut en bas.

On peut trouver, dit-il, dans cette poussée le moyen de tenir un tube, qui serait plongé verticalement dans l'eau, fermé par une plaque bien dressée sur ce tube, et qui n'y serait aucunement assujettie. Pour cela, on appliquerait la plaque tout simplement sur l'orifice inférieur du tube, on plongerait celui-ci dans l'eau en soutenant la plaque jusqu'à une certaine profondeur ; la plaque alors resterait exactement appliquée à cet orifice par l'action seule de l'eau, et la force qui agirait sur cette plaque serait d'autant plus grande que le tube serait plus profondément plongé. Il faut remarquer que la plaque ne resterait appliquée à l'orifice qu'à une certaine profondeur car, à la surface de l'eau, elle ne s'y tiendrait pas, si elle était d'une pesanteur spécifique plus grande que celle-ci. Mais lorsqu'elle est placée à une profondeur telle que le poids de la colonne qui la presse de bas en haut est supérieur ou au moins égal à celui de la plaque elle ferme exactement l'orifice du tube. La densité de la matière dont la plaque est composée détermine donc le degré d'enfoncement auquel on doit porter le tube, ainsi, comme la fonte est, sous le même volume, environ sept fois plus pesante que l'eau, il faudrait plonger l'extrémité du tube et la plaque, si elle était de fonte, à une profondeur au moins sept ou huit fois plus grande que son épaisseur.

Lois générales d'hydrodynamique

L'hydrodynamique est, comme nous l'avons dit, la science qui apprend à connaître les phénomènes que présentent les fluides en mouvement.

Le plus important de ces phénomènes pour nous, c'est celui de l'écoulement de l'eau par les ouvertures d'un réservoir, puisque c'est de cette manière que la force motrice de l'eau est transmise à la plupart des machines hydrauliques, et notamment aux roues. Le principe théorique de cet écoulement est celui-ci :

La vitesse de l'eau à la sortie d'un orifice pratiqué dans les parois d'un réservoir, est celle qu'aurait acquise un corps grave en tombant librement de la hauteur comprise entre le niveau de la surface fluide dans le réservoir et le centre de cet orifice.

Cette loi d'hydrodynamique est connue sous le nom de théorème de Torricelli, disciple de Galilée, elle a été démontrée par lui en 1643. C'est Torricelli qui a expliqué aussi pourquoi l'eau se soutenait au-dessus de son niveau dans un tube privé d'air et fermé à son extrémité supérieure, et pourquoi elle pourrait s'y élever jusqu'à 32 pieds de haut sans pouvoir dépasser cette hauteur.