

LIVRE II

HYDROSTATIQUE

CHAPITRE I

Transmission des pressions. Liquides pesants. Applications.

§ I. — DÉFINITIONS.

1. *Liquides*. — On peut définir les liquides par une propriété qui leur est commune avec les gaz : leurs molécules, au lieu d'être liées les unes aux autres, comme dans les solides, peuvent glisser sans frottement les unes sur les autres. Pour les distinguer des gaz, nous signalerons cette autre propriété : leur compressibilité à peu près nulle ; quelque forte que soit la pression qu'ils subissent, leur volume est à peu près invariable.

Cette deuxième propriété nous amène donc à définir la pression.

2. — Soit un fluide, liquide ou gaz, contenu dans une enveloppe résistante A ; si le fluide tend à sortir de cette enveloppe, à augmenter son volume, on dit qu'il exerce une pression sur cette enveloppe.

Soit une très petite surface S de l'enveloppe ; si elle forme un petit piston pouvant se déplacer, on constate qu'il faut exercer une force F, pour la maintenir en place.

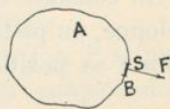


Fig. 17.

On appelle pression du fluide au point B le rapport $\frac{F}{S}$.

En unités CGS, on l'évaluera en grammes par centimètre carré. Fréquemment en pratique (machines en particulier), on la comptera en kilogrammes par centimètre carré.

§ II. — TRANSMISSION DES PRESSIONS. PRINCIPE DE PASCAL.

Soit un fluide contenu dans une enceinte résistante A ; ce fluide pourra être un liquide ou un gaz, les conclusions auxquelles nous arriverons seront identiques.

On supposera seulement que le fluide a un poids négligeable ; en parlant des liquides pesants, on pourra constater les corrections que le poids du fluide nous amènerait à faire à la loi simple de la transmission des pressions.

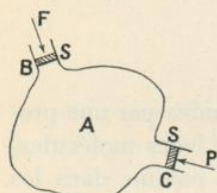


Fig. 18.

En un point B, un cylindre de section S permet le déplacement d'un piston sur lequel on peut faire agir une force ; si le fluide est un liquide, par suite incompressible, le piston ne se déplacera pas quand on exercera une pression sur lui. Si c'est un gaz, son volume diminuant sous l'effet de la pression, le piston s'enfoncera.

Si on exerce au point B une force F sur une section S, on soumet le fluide à la pression $P = \frac{F}{S}$.

On constate qu'en un autre point C quelconque de l'enveloppe, un piston de même surface ne pourra être maintenu à sa position qu'au moyen d'une force égale F ; donc en ce point C, il s'exerce la même pression $P = \frac{F}{S}$.

En tous les points de l'enveloppe, la pression est la même, et partout normale à l'enveloppe. Il s'ensuit que, si en C le piston, au lieu d'avoir une surface S, avait une surface 10 S, 100 S ou 1000 S, il faudrait une force 10 F, 100 F ou

1000 F pour le maintenir. C'est le principe de Pascal, applicable aux liquides comme aux gaz contenus dans une enveloppe et soumis à une certaine pression.

§ III. — APPLICATION. PRESSE HYDRAULIQUE.

Une application immédiate du principe de Pascal se trouve dans la presse hydraulique ; on exerce sur le liquide contenu dans l'appareil (fig. 19) une pression au moyen d'un petit piston de pompe p ; le plus souvent, c'est une pompe à piston plongeur. Un gros piston P sert à comprimer des objets A sur une pièce fixe F .

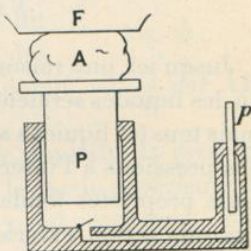


Fig. 19.

Si la force exercée sur le piston p est (F) , les surfaces des 2 pistons S et s , l'effort exercé sur A est :

$$\frac{F \times S}{s} ; \text{ on a donc multiplié l'effort par le rapport } \frac{S}{s}$$

qui peut être considérable.

Dispositions de détail. — La difficulté est d'avoir sur cet appareil des joints suffisamment étanches ; l'eau soumise à une forte pression tend à gicler par tous les joints. Sur le petit piston p , on emploie généralement un presse-étoupe.

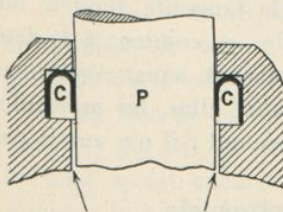


Fig. 20.

Mais le grand piston P a une circonférence trop considérable pour permettre l'emploi d'une disposition analogue.

On utilise alors un joint avec un cuir embouti : le piston P est entouré par un cuir C en forme de gouttière ou de demi-tore logé dans une rainure du bâti de la machine.

La pression intérieure tend à appliquer énergiquement ce cuir dans sa rainure et contre le piston ; plus la pression de l'eau est forte, plus le cuir est distendu énergiquement. On a donc un joint très étanche et devenant de plus en plus étanche au fur et à mesure que la pression augmente.

§ IV. — LIQUIDES PESANTS. SURFACE LIBRE. VASES COMMUNICANTS.

Jusqu'ici, on a raisonné dans le cas tout à fait hypothétique où les liquides seraient soustraits à l'action de la pesanteur ; mais tous les liquides sont pesants. Cette propriété provoque des pressions à l'intérieur des liquides, mais sans détruire leurs propriétés fondamentales. Si, de plus, on exerce sur eux une action extérieure, les effets causés par cette action et par la pesanteur se superposent.

1. *Surface libre.* — La surface libre d'un liquide pesant, contenu dans un vase et en état d'équilibre, est horizontale ; en effet, soit une surface quelconque MN limitant le liquide

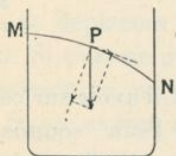


Fig. 21.

à sa partie supérieure : en un point M, la molécule tend à glisser, car, la tangente à la surface libre n'étant pas horizontale, on peut décomposer l'action de la pesanteur suivant la tangente et la normale ; la composante suivant la tangente tend à entraîner la molécule, et, comme (§ I) dans un liquide les molécules se déplacent sans résistance, puisqu'il n'y a pas de frottement entre elles, les molécules telles que P se mettraient en mouvement : il n'y aurait pas d'équilibre.

Donc la surface libre doit être horizontale.

2. — Comment sont réparties les pressions dans le liquide pesant ? La pression exercée en un point quelconque est indépendante de l'orientation de la surface sur laquelle elle s'exerce ; elle ne dépend d'autre part que de la distance

comptée verticalement, qui sépare cette surface de la surface libre.

Soit (fig. 22) un vase de forme quelconque contenant un liquide ; MN la surface libre horizontale ; menons un plan AB horizontal à distance h de la surface MN. Tous les points du vase situés sur ce plan subissent la même pression ; d'autre part, ces pressions sont normales à la surface comme on l'a dit au § II. Les pressions p , p' auront des directions différentes aux différents points situés sur AB, mais leur valeur sera la même.

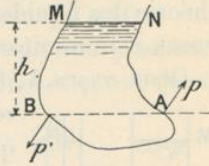


Fig. 22.

Il n'y a donc pas à considérer, pour connaître la pression en un point d'un liquide, la forme de la partie supérieure du vase, ni la quantité de liquide qui y est contenue, mais seulement la distance qui sépare le point de la surface libre, distance comptée verticalement.

Pour savoir quelle est cette valeur de la pression, considérons (fig. 23) un vase cylindrique vertical de section S , rempli de liquide sur une hauteur h . Cette colonne liquide peut être décomposée en petits éléments mn dont le poids tend à comprimer les éléments placés au-dessous. Ces efforts se retrouvent intégralement sur le fond.

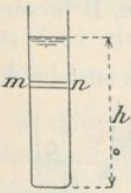


Fig. 23.

Donc, si d est le poids de l'unité de volume du liquide, la force agissant sur le fond est Shd et la pression est $p = hd$.

Si, au lieu de la forme cylindrique AB, j'avais pris un vase CD (fig. 24) la pression sur le fond serait encore la même, quoique le poids de liquide contenu soit plus considérable ; cela tient à ce que, dans une section pq , il n'y a que la partie mn située au-dessus du fond qui transmette son action intégralement sur le

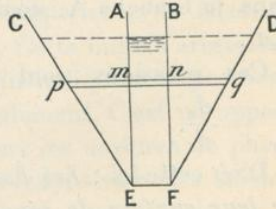


Fig. 24.

fond. Les parties pm , nq ne contribuent pas à faire effort sur le fond EF .

3. *Vases communicants*. — Une application directe de la théorie des liquides pesants se trouve dans l'appareil appelé vases communicants.

Deux vases A , B , sont réunis par leur partie inférieure et remplis d'un même liquide; on constate que le niveau dans les deux vases se trouve à la même hauteur: c'est que les deux surfaces M , N constituent la surface libre du vase (AB); toute la surface libre étant, on vient de le dire, horizontale, M et N sont sur un même plan horizontal, par suite à la même hauteur.

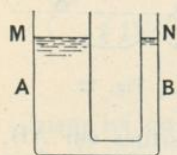


Fig. 25.

Si l'on met dans les deux vases A , B , des liquides de densités différentes, le problème est plus complexe; les liquides restent à des hauteurs différentes; mais on peut trouver la différence de hauteur entre leurs niveaux. Soit A la surface libre de l'un, C celle de l'autre, B la surface de séparation (fig. 26).

Menons le plan horizontal MN passant par la surface de séparation B des deux liquides (1) et (2). On a dit plus haut qu'en tous points situés sur un plan horizontal la pression était la même dans un même liquide. On peut considérer tous les points de ce plan comme situés dans le liquide (2), puisqu'ils sont sur sa surface de séparation avec (1).

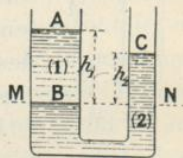


Fig. 26.

En évaluant la pression comme on l'a indiqué plus haut, dans la branche A , nous avons $h_1 d_1$; dans la branche C , $h_2 d_2$.

Ces pressions sont égales, donc $h_1 d_1 = h_2 d_2$ ou :

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{d_2}{d_1}.$$

D'où cette loi : *Les hauteurs des deux liquides au-dessus de leur surface de séparation sont en raison inverse des densités.*

§ V. — APPLICATIONS.

1. *Niveau d'eau.* — Cet appareil est basé sur la propriété des vases communicants. Un tube de métal est fixé sur un pied à trois branches, de façon à pouvoir être posé sur le sol ; le tube se recourbe à ses extrémités et porte deux

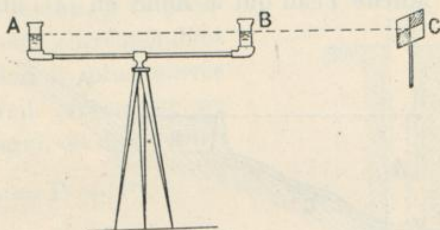


Fig. 27.

fiols de verre. On remplit l'appareil d'eau, de façon à avoir les niveaux du liquide dans les fiols à peu près à mi-hauteur.

L'observateur regarde suivant la ligne AB tangentant les deux niveaux et peut ainsi faire placer à distance une mire C sur l'horizontale AB.

2. *Niveau à bulle d'air.* — Ce niveau sert à vérifier l'horizontalité d'un plan. Il est formé d'un tube de verre légèrement recourbé, rempli d'eau sauf un petit espace qui est occupé par une bulle d'air ; le tube est contenu dans

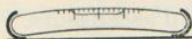


Fig. 28.

une monture et divisé à sa partie supérieure de façon à noter les déplacements de la bulle. Cette bulle s'arrête au point le plus élevé du tube ; des traits indiquent sa position quand l'appareil est placé horizontalement. C'est un appareil très sensible et très employé dans les mesures de physique et d'astronomie exigeant que les instruments soient placés d'une manière très précise.

3. *Distribution d'eau dans les villes.* — Un ruisseau A est capté et dirigé sur un réservoir R où l'eau s'accumule ; ce réservoir a l'avantage de pouvoir constituer une réserve d'eau pour les époques de sécheresse où la consommation d'eau est supérieure au débit du ruisseau A.

La ville à alimenter se trouve en contre-bas en V. Une conduite C amène l'eau qui a donc en (a) une pression

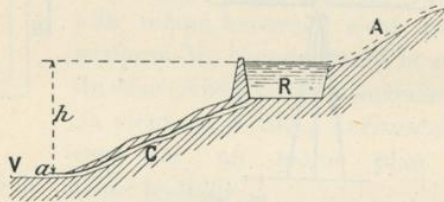


Fig. 29.

déterminée par la hauteur h du niveau du réservoir au-dessus de (a). Cette hauteur doit être suffisante pour que l'eau puisse arriver à tous les étages des maisons ; il n'y a pas d'intérêt à ce qu'elle soit trop forte, car il faudrait établir des conduites très résistantes et l'eau sous pression giclerait avec une force considérable qui pourrait être gênante quand on ouvrirait les robinets.

4. *Ascenseur hydraulique.* — La présence d'eau sous pression, dans toutes les villes munies d'un tel service d'eau, permet l'installation d'ascenseurs. Un piston porte la chambre mobile formant l'ascenseur qui se meut dans une cage ; ce piston très long descend dans un puits où l'eau peut arriver par un tiroir de distribution T ; ce tiroir permet l'accès dans le puits de l'eau sous pression ou son évacuation dans l'égout.

En général, une corde conduit ce tiroir ; ou bien elle traverse l'ascenseur et peut être tirée à la main pour mettre en mouvement et arrêter l'appareil, ou bien elle est accrochée automatiquement (fig. 30) par un bras B de la cage

et ferme par suite l'admission d'eau quand l'ascenseur est arrivé à la hauteur voulue.

On voit, pour que l'appareil puisse fonctionner, que, si P est son poids mort, P' celui des voyageurs, S la surface du piston, p la pression de l'eau correspondant à la position la plus élevée de l'appareil (ascenseur au dernier étage), on doit avoir :

$$Sp = P + P'.$$

Il y aura donc intérêt à faire le puits le plus profond possible et la tige par suite très longue, pour avoir la pression la plus forte possible ; à condition toutefois que l'augmentation de poids de la tige n'absorbe pas tout le gain de la pression.

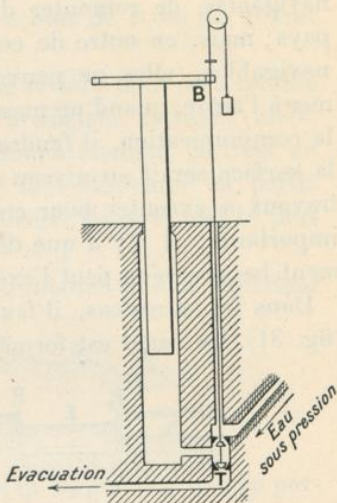


Fig. 30.

5. *Ascenseur hydro-électrique.* — L'inconvénient de l'appareil précédent est qu'en été, par exemple, quand les niveaux des réservoirs sont bas, la pression est diminuée d'autant ; les ascenseurs ont donc moins de force et parfois ne peuvent plus monter aux derniers étages. On y remédie par la disposition hydro-électrique qui permet d'obtenir beaucoup de régularité dans le jeu de l'appareil : au lieu d'admettre directement l'eau dans le puits, on la pompe avec une machine, conduite électriquement, qui la refoule dans le puits. On peut ainsi obtenir une pression plus constante, plus forte que la pression ordinaire, ce qui permet de réduire la surface du piston. Au lieu de commander l'appareil par un tiroir à eau, on met en marche par un commutateur qui provoque la mise en marche du moteur électrique.

6. *Canaux.* — Les rivières permettent, quand elles sont navigables, de remonter de la mer dans l'intérieur d'un pays; mais, en outre de ce qu'elles ne sont pas toujours navigables, elles ne peuvent permettre de passer d'une mer à l'autre, quand un massif élevé les sépare. Pour établir la communication, il faudrait l'existence d'un canal, dont la surface serait au niveau des deux mers. Par suite, les travaux à exécuter pour creuser un tel canal seraient trop importants; il n'y a que dans le cas de terres suffisamment basses qu'on peut l'exécuter (Suez).

Dans les autres cas, il faut employer un canal à écluses (fig. 31). Le canal est formé d'un certain nombre de biefs,

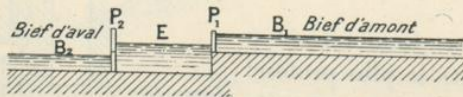


Fig. 31.

$B_1, B_2 \dots$ à des niveaux différents, reliés entre eux par des écluses E. L'écluse est un sas permettant le passage des bateaux d'un bief, B_1 , à un autre, B_2 , de niveau différent.

Pour cela, l'écluse est fermée par deux portes P_1, P_2 , s'ouvrant vers le côté d'où vient la pression, donc toujours vers l'amont du canal. Ces portes sont munies de vannes qui permettent de mettre l'écluse en communication avec un bief ou avec l'autre.

Ainsi, un bateau venant de B_1 entrera dans l'écluse préalablement mise en communication avec B_1 ; l'égalité de niveau étant établie en E et en B_1 , la porte P_1 s'ouvrira sans difficulté et toute la pression se reporte sur P_2 ; on ferme P_1 , une fois le bateau dans l'écluse.

On met E et B_2 en relation et le niveau baisse jusqu'à celui de B_2 ; alors P_2 peut s'ouvrir et le bateau passer sur B_2 .

La même opération effectuée en sens inverse permet le passage de B_2 en B_1 . On voit qu'à chaque opération une

quantité d'eau égale à la surface de l'écluse multipliée par la différence des niveaux B_1 , B_2 s'écoule de B_1 en B_2 . Il faut donc alimenter les biefs d'amont.

Si le canal est constitué par une rivière dont on a rectifié le cours et muni les échelons artificiels, formant biefs, d'écluses, son débit peut suffire pour alimenter. Si c'est un canal complètement artificiel, il faut alimenter sa partie haute par une rivière captée et dirigée dans le bief le plus élevé.

On peut ainsi, à condition d'alimenter le bief supérieur

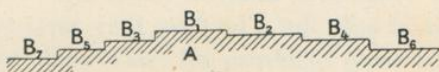


Fig. 32.

B_1 , passer d'un niveau B_7 au niveau B_6 par-dessus une partie élevée A.

Si le débit de la rivière canalisée ou de la rivière captée et envoyée en B_1 est supérieur au débit occasionné dans les écluses par le passage des bateaux, il faut prendre des précautions pour éviter que l'eau ne monte d'une façon anormale et ne passe par-dessus les portes.

On y remédie au moyen de déversoirs (fig. 33).

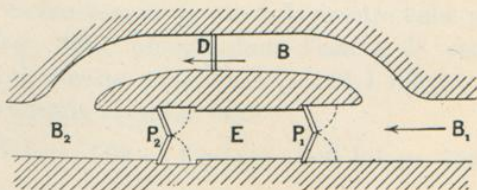


Fig. 33.

Le bief B_1 communique avec B_2 non seulement au moyen de l'écluse E, mais au moyen d'un bras B sur lequel est établi un déversoir D.

A ce déversoir D (fig. 34), se retrouve la différence de

niveau entre B_1 et B_2 ; et si le niveau de B_1 s'élève trop, le déversoir permet la décharge directe en B_2 ; l'écluse est donc toujours protégée contre une élévation anormale des niveaux supérieurs.

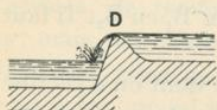


Fig. 34.

On voit qu'en général toute installation de canal devra comporter, à côté de chaque écluse, l'installation d'un déversoir.

CHAPITRE II

Corps flottants. Densité.

§ I. — PRINCIPE D'ARCHIMÈDE.

Les corps solides plongés dans un liquide viennent à la surface ou coulent au fond ; dans le premier cas, on a les corps flottants ; les corps allant au fond sont dits « fondriers ». Mais les corps qui vont au fond n'ont plus le même poids apparent que dans l'air ; ils semblent peser moins. Il est rare qu'un corps reste en équilibre au milieu d'un liquide, il faudrait l'égalité absolue de son poids et du liquide déplacé, comme on le verra plus loin. Tous ces phénomènes sont expliqués par le principe d'Archimède, qui s'énonce ainsi :

Tout corps plongé dans un liquide perd de son poids, le poids du volume du liquide qu'il déplace.

1. *Corps fondrier.* — Le corps allant au fond déplace un volume de liquide égal à son propre volume ; donc le calcul de la diminution de poids se fait immédiatement. Par exemple, un morceau de fer de 1 décimètre cube pèse dans l'air 7 kilogr. 780 ; plongé dans l'eau à 4° centigr., il déplace un décimètre cube d'eau pesant 1 kilogr.

Donc son poids apparent sera :

$$7 \text{ kilogr. } 780 - 1 \text{ kilogr. } = 6 \text{ kilogr. } 780.$$

2. *Corps flottant.* — Soit un corps d'un volume égal à 1 décimètre cube ; il ne pèse que 600 grammes. Si on le plongeait complètement dans l'eau, il déplacerait 1 kilogr. d'eau, son poids apparent serait négatif ; c'est donc qu'il a une tendance à remonter à la surface.

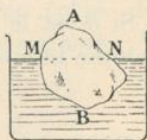


Fig. 35.

Physique et chimie. — GILLE.

En effet, si on le laisse libre de flotter à la surface, il en émergera une partie MAN, telle que la partie du corps comprise sous le plan de la surface, c'est-à-dire MBN, représente un volume d'eau pesant le poids du corps, soit 600 grammes.

§ II. — POUSSEE. CENTRE DE POUSSEE. ÉQUILIBRE D'UN CORPS FLOTTANT.

L'effet du liquide déplacé par le corps est une force verticale ascendante, puisqu'elle diminue le poids.

Cette force (fig. 36) est appliquée en C, centre du volume MBN compris sous le plan de la surface libre du liquide. C'est le centre de poussée.

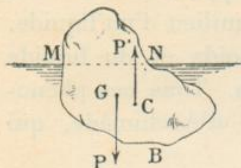


Fig. 36.

Le corps dont une partie plonge dans un liquide est donc soumis à deux forces parallèles, son poids P appliqué au centre de gravité G et la

poussée P' appliquée au centre de poussée. Pour que le corps soit en équilibre, il faut que les deux forces soient égales et situées sur la même droite (cf. Mécanique).

Il faut donc que $P = P'$ et que la ligne GC soit verticale.

En résumé, un corps flotte en équilibre à la surface d'un liquide, quand le centre de poussée est sur la verticale du centre de gravité et quand le poids du liquide déplacé est égal au poids du corps. L'étude de la stabilité de l'équilibre des corps flottants fait l'objet de la Théorie du Navire.

Si d est le poids de l'unité de volume du liquide, V le volume immergé du solide :

$$P' = Vd. \text{ Donc : } P = Vd.$$

Exemple. — Un bâtiment pèse 3.000 t. (Déplacement total). Quel est le volume immergé de la carène ? L'eau de mer pèse 1 kg. 026 le décimètre cube. Donc la partie immer-

gée représente un volume de $\frac{3.000}{1,026} = 2.925$ mètres cubes.

Dans l'eau douce, d'autre part, le poids du mètre cube est à peu près 1 tonne ; il s'ensuit que le volume immergé sera 3.000 mètres cubes ; en passant de l'eau de mer dans l'eau douce le bâtiment subira un enfoncement de 75 mètres cubes, soit $\frac{75}{3.000} = \frac{1}{40}$ du volume en eau douce.

§ III. — DENSITÉS.

La densité d'un corps de masse M et de volume v est le quotient de la masse par le volume $d = \frac{M}{v}$; il ne faut pas confondre la densité avec le poids spécifique qui est le rapport du *poids* au volume : $\frac{P}{v}$. Par suite, le poids spécifique dépend de l'accélération de la pesanteur et varie avec la latitude ; au contraire, la masse étant une constante caractéristique du corps, la densité ne varie pas.

Elle varie cependant avec les conditions extérieures ; on verra dans l'étude des phénomènes calorifiques que le volume des corps change avec la température ; le dénominateur de la fraction $\frac{M}{v}$ variant, la densité varie.

On peut donner une autre définition de la densité ; on sait que l'unité de poids pratique, le kilogramme, représente le poids d'un décimètre cube d'eau à 4° centigrades. Si donc je compare le poids Mg d'un corps de volume v à celui d'un égal volume d'eau, j'ai le rapport :

$$\frac{Mg}{\text{poids du vol. } v \text{ d'eau à } 4^{\circ}} = \frac{Mg}{vmg} ;$$

m , masse de l'unité de volume d'eau, est, par définition, l'unité de masse, donc ce rapport devient $\frac{M}{v} = d$.

Le nombre qui exprime la densité est donc égal au rapport du poids du solide au poids d'un égal volume d'eau distillée à 4°.

On peut encore dire, ce qui n'est que la première définition mise sous une autre forme : *la densité d'un corps est la masse de l'unité de volume.*

§ IV. — MESURE DE LA DENSITÉ DES CORPS SOLIDES.

Elle se fait en général en comparant le poids du solide au poids du volume égal d'eau ; mais en raison de la difficulté d'obtenir exactement la température de 4°, on opère plus souvent avec de l'eau à 0° ; cela nécessite une correction qui est faite ensuite.

1. *Procédé de la balance hydrostatique.* — C'est une application immédiate du principe d'Archimède. Le corps

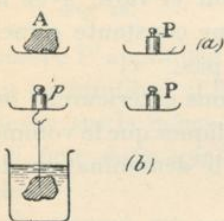


Fig. 37.

solide est d'abord placé dans le plateau d'une balance (fig. 37 a) et pesé ; soit P le poids trouvé. Ensuite, le corps est suspendu au-dessous du plateau de la balance et plongé dans un vase rempli d'eau ; il y a, comme l'indique le principe d'Archimède, une diminution de poids égale au poids du volume d'eau déplacé. On doit ajouter

un poids p pour rétablir l'équilibre : p est le poids de ce volume d'eau.

D'après ce qu'on a dit au § III, si l'eau est à 4°, la densité est donnée immédiatement par le rapport $d = \frac{P}{p}$.

2. *Procédé du flacon.* — Le corps est pesé et trouvé de poids égal à P ; ensuite, il est placé dans un flacon comme l'indique la figure 38 ; ce flacon a été préalablement rempli d'eau jusqu'à un niveau A ; quand on introduit le corps et

qu'on rebouche le flacon, il en sort une certaine quantité d'eau que l'on peut évaluer en faisant la différence des poids : 1° du corps + le flacon plein ; 2° du flacon contenant le corps ; cette différence donne le poids d'eau expulsée. Si p est ce poids et si l'eau est à 4°, on a : $d = \frac{P}{p}$.



Fig. 38.

3. *Procédé de l'aréomètre.* — L'aréomètre de Nicholson n'est qu'une application du procédé de la balance, mais celle-ci a la forme particulière d'un flotteur.

L'appareil se compose d'un flotteur F portant un plateau à sa partie haute et un autre suspendu à sa partie inférieure. Le corps à peser est mis sur le plateau dont on complète la charge avec des poids, de façon à amener un certain point A de la tige à affleurer l'eau (fig. 39 *a*) ; on peut ensuite enlever le corps et le remplacer par des poids marqués, jusqu'à obtenir le même point d'affleurement. Toutes les conditions étant les mêmes, c'est que le poids ajouté représente le poids du corps.

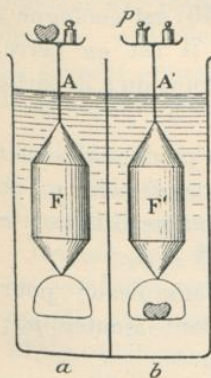


Fig. 39.

Ensuite, on met le corps dans le plateau inférieur et, pour réaliser les conditions figurées en (*a*), il faut encore ajouter un poids p qui indique la diminution de poids due à l'immersion du corps.

Si l'eau est à 4° comme précédemment, on obtient la densité par le quotient $d = \frac{P}{p}$.

§ V. — MESURE DE LA DENSITÉ DES LIQUIDES.

On peut employer trois méthodes en tous points semblables aux trois méthodes exposées précédemment.

1. — On suspend sous une balance une masse quelconque, une sphère de verre, par exemple ; on cherche la poussée qu'elle subit dans le liquide dont on veut obtenir la densité. Soit P : c'est le poids du volume du liquide déplacé. Puis on cherche la poussée due à de l'eau pure ; soit p :

c'est le poids du même volume d'eau : $d = \frac{P}{p}$.

2. — On remplit un flacon du liquide étudié, puis d'eau pure ; on note les poids obtenus ; ces poids, par différence avec celui du flacon vide, donnent les poids des mêmes volumes d'eau et de liquide.

3. — L'aréomètre de Fahrenheit (fig. 40) est analogue à l'aréomètre de Nicholson, mais il est en verre, lesté et ne porte pas de plateau suspendu à la partie basse.

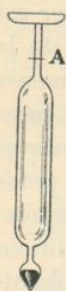


Fig. 40.

On le pèse d'abord ; soit A son poids ; on le met dans le liquide étudié et on le charge de poids p_1 , de façon à le faire affleurer en A . Comme il flotte, le poids du liquide déplacé est $P = A + p_1$.

On fait la même opération dans l'eau ; pour l'amener à affleurer en A , il faut ajouter p_2 ; $A + p_2$ est le poids d'eau déplacée.

Donc : $d = \frac{A + p_1}{A + p_2}$, puisque les deux volumes déplacés sont les mêmes.

4. *Aréomètre à volume variable.* — Les aréomètres précédemment décrits, celui de Nicholson et celui de Fahrenheit, plongent toujours jusqu'au même point ; on opère avec eux sur un volume constant. On emploie souvent des aréomètres dits à volume variable qui, par simple lecture du point où ils affleurent, donnent la densité du liquide étudié. Ils n'exigent donc qu'une lecture et plus du tout l'emploi de poids marqués.

a) *Aréomètre de Baumé*. — Il se compose d'un réservoir lesté A surmonté d'une tige cylindrique que l'on divisera ; suivant la densité du liquide, l'appareil enfoncera plus ou moins.

Pour le graduer, Baumé marquait 0 dans l'eau pure et 15 dans un liquide contenant 15 parties de sel marin et 85 d'eau : la division est prolongée au delà.

Pour les liquides plus légers que l'eau, il existe une autre graduation, mais beaucoup moins employée.

On voit immédiatement que ces appareils ne donnent pas la densité par lecture de leur graduation, mais des indications conventionnelles ; ils servent cependant fréquemment, surtout dans le commerce, pour fixer les densités de certains produits.

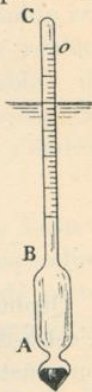


Fig. 41.

b) *Alcoomètre centésimal*. — Gay-Lussac a gradué cet appareil de façon à donner la proportion exacte d'alcool et d'eau dans un mélange.

On met dans différents vases gradués 1/10, 2/10, 3/10... de leur contenance d'alcool absolu et on achève de les remplir avec de l'eau. On a ainsi des mélanges à 10 %, 20 %... d'alcool. On plonge l'aréomètre dans l'eau pure et on marque 0. Dans l'alcool absolu on marque 100 ; dans les divers mélanges, on marque 10, 20, etc. Les intervalles 0-10, 0-20 etc. ne sont pas égaux, mais ils diffèrent assez peu ; on les divise, chacun en 10 parties égales. Par simple lecture de l'appareil, on connaît donc la teneur en alcool d'un mélange où on l'a mis à flotter.

L'appareil a été construit à 15° centig. ; il n'est plus juste à d'autres températures ; mais il existe, en général, avec chaque appareil, une table donnant la correction à faire suivant la température.

Il faut donc, après une lecture, examiner le thermomètre et faire la correction d'après la Table précitée.

CHAPITRE III

Capillarité.

§ I. — FAITS GÉNÉRAUX.

Quand on plonge dans l'eau un tube de verre capillaire, c'est-à-dire un tube dont l'ouverture intérieure est très fine, on constate que le niveau intérieur AB est plus élevé que le niveau extérieur CD du liquide; cette élévation est d'autant plus grande que le canal est plus étroit. Tous les

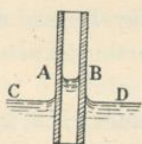


Fig. 42.



Fig. 43.

liquides qui *mouillent* le verre, alcool, huile, etc., produisent le même résultat : une élévation du niveau dans les tubes étroits (fig. 42).

Si, au contraire, l'expérience porte sur un liquide ne mouillant pas le verre, du mercure par exemple, le résultat est inverse (fig. 43) : il y a dépression du niveau dans le tube capillaire.

Il y a en même temps un changement dans la forme de la surface ; elle est concave quand elle est surélevée (fig. 42) et convexe quand elle est déprimée (fig. 43).

Tous ces phénomènes semblent contredire les lois déjà exposées de l'Hydrostatique ; ils proviennent de forces dues à l'attraction moléculaire.

§ II. — ATTRACTION MOLÉCULAIRE.

1. — Une gouttelette de mercure posée sur une table se rassemble en une petite sphère et on peut la faire rouler sans qu'elle s'aplatisse d'une manière appréciable ; il semble que les molécules du mercure soient attirées les unes contre les autres, et empêchent le mercure de s'étaler librement.

2. — Trempons une baguette de verre dans de l'eau ; quand on la ressortira, il restera une gouttelette suspendue à son extrémité ; c'est donc que les molécules de cette goutte d'eau restent attirées par la baguette avec une force qui équilibre leur poids et les empêche de tomber.

Une molécule liquide subit donc une attraction de la part des molécules liquides et solides voisines, comme l'observation des phénomènes précédents vient de nous le montrer. Le rayon d'action de la force exercée par une molécule sur les voisines est extrêmement faible.

§ III. — PHÉNOMÈNES DUS AU CONTACT DES SOLIDES ET DES LIQUIDES.

1. *Lois de l'ascension des liquides dans les tubes capillaires.* — Pour un même liquide, à une même température, les hauteurs moyennes soulevées sont en raison inverse des diamètres des tubes. Cette hauteur est indépendante de la forme du tube capillaire dans les régions où ne se tient pas le ménisque ; elle varie avec la nature des liquides et la température ; les hauteurs soulevées diminuent quand la température s'élève, et finissent par s'annuler.

Par exemple, plongeons dans un même liquide des tubes de formes diverses (fig. 44), mais ayant même diamètre dans la partie où se tient le ménisque. Les hau-

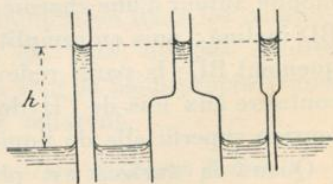


Fig. 44.

teurs d'ascension sont les mêmes dans les tubes, et pourtant les poids soulevés sont différents.

Avec des liquides différents, on a des hauteurs h différentes ; les expériences de Gay-Lussac sur un tube de 1^{mm} 295 de diamètre ont permis de relever des valeurs de h égales à :

9^{mm} 182 pour l'alcool à 0,819 de densité,

9^{mm} 997 pour l'alcool à 0,941,

9^{mm} 952 pour l'essence de térébenthine.

2. *Ascension entre deux lames parallèles.* — Les lois sont les mêmes, sauf que la hauteur est moitié de celle qui se produit dans un tube de diamètre égal à la distance des lames. Autrement dit, la hauteur d'ascension du même liquide, à la même température, est la même entre deux lames parallèles à la distance d et dans un tube de section circulaire dont le rayon est d .

3. *Tension superficielle.* — Il semble que la surface du liquide soit constituée par une pellicule mince qui exerce des tractions dans toutes les directions.

Une expérience de Dupré met ce fait en évidence : un

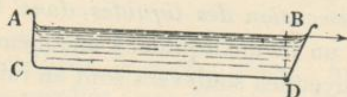


Fig. 45.

vase rectangulaire plat ABCD a une paroi verticale BD mobile autour d'une charnière horizontale D. On maintient BD incliné ; puis on remplit le vase d'eau et on lâche brusquement BD ; la paroi redevient verticale. Ce phénomène contraire aux lois de l'Hydrostatique est dû à une sorte de tension superficielle du liquide.

Quand la surface est plane, il n'existe qu'une force horizontale ; mais, si la surface est courbe, il existe une force verticale qui s'ajoute ou se retranche à la pression

hydrostatique, suivant que la surface est convexe ou concave. C'est cette force qui produit l'ascension ou la dépression dans les tubes capillaires. Elle varie suivant la courbure des ménisques.

4. *Liquides qui ne mouillent pas les solides.* — Les lois relatives à ce cas sont identiquement les mêmes que dans le cas de liquides qui mouillent les solides, mais, au lieu d'ascension, on observe des dépressions.

§ IV. — APPLICATIONS.

1. *Colonne liquide emportée par un tube ouvert.* — Soit un tube capillaire, dans lequel l'ascension du liquide est h ; il se forme un ménisque concave; ce ménisque produit (§ III-3) une force verticale N qui équilibre le poids de la colonne h ; si nous enlevons le tube, il reste du liquide à l'intérieur; et à sa partie inférieure, si on a pris la précaution de tailler le bout du tube en biseau, il se produit un ménisque de même forme, mais convexe, qui donne donc une seconde force N ; les forces verticales sont alors égales à $2N$, donc elles peuvent soulever une hauteur $2h$. La quantité enlevée du liquide est de longueur $2h$, double de la hauteur d'ascension dans le tube.

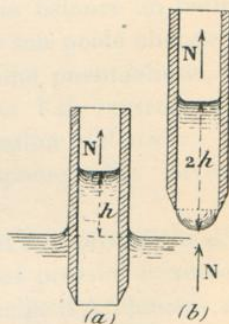


Fig. 46.

Ce phénomène reçoit une application dans les compte-gouttes; on a démontré (Loi de Tate) que les gouttes données par un compte-gouttes sont de poids proportionnel aux diamètres des tubes qui les délivrent.

2. *Exceptions aux lois de l'équilibre des corps flottants.* — Une aiguille d'acier légèrement graissée, placée sur de l'eau, reste à la surface, bien que son poids soit supérieur

à son déplacement ; c'est qu'elle forme à la surface de l'eau un ménisque concave donnant lieu à une force N , verticale, ascendante, qui équilibre le poids (fig. 47).



Fig. 47.

C'est ainsi que l'on voit également des insectes marcher sur l'eau sans enfoncer ; leurs pattes sécrètent des substances huileuses produisant au contact de l'eau des phénomènes capillaires ; des forces telles que N se produisent, équilibrent leur poids et leur permettent de marcher sur la surface.
