

112. Pèse-sels centésimaux. — Lorsqu'on a besoin de déterminer la richesse de solutions diverses d'un même sel, on peut graduer un *pèse-sels* centésimal pour cet usage, en se servant de ce sel lui-même, comme on s'est servi de l'alcool pour graduer l'alcoomètre. C'est ce qu'on fait dans quelques fabriques, et c'est ainsi encore qu'on a pu construire des *pèse-vins*, des *pèse-laits*, etc. — Mais la confiance qu'on peut avoir dans ces instruments est toujours subordonnée à l'hypothèse que le liquide soumis à l'essai ne contient aucune matière étrangère.

115. Volumètres. — Densimètres. — Un aréomètre peut être gradué de façon à donner, soit la densité d'un liquide (poids de l'unité de volume), soit le volume occupé par l'unité de poids de ce liquide. L'instrument prend alors le nom de *densimètre*, ou de *volumètre*.

Pour graduer un *volumètre* destiné aux liquides plus denses que l'eau, on règle le poids de l'appareil de façon qu'il s'enfonce dans l'eau pure jusqu'au haut de la tige, et l'on marque 100 au point d'affleurement. On le plonge ensuite dans un liquide dont la densité soit connue, $\frac{1}{2}$ par exemple : il s'enfonce d'une quantité moindre, et le poids du liquide déplacé étant le même dans les deux cas, les volumes plongés sont en raison inverse des densités. Si le premier volume était représenté par 1, le second devrait être représenté par $\frac{2}{1}$; le premier ayant été désigné par 100, le second doit être marqué 75. On partage l'intervalle en 25 parties égales, et l'on prolonge ces divisions jusqu'au bas de la tige (*). — Si, dans un liquide donné, un volumètre s'enfonce jusqu'à la division 95, c'est qu'un même poids, celui de l'instrument, représente 100 volumes d'eau et 95 volumes de ce liquide. Or 1 kilogramme d'eau représente un litre; donc 1 kilogramme du liquide soumis à l'expérience représente 0,95.

Un instrument étant gradué comme volumètre, il est facile d'en déduire les indications de cet instrument fonctionnant comme *densimètre*. — En effet, pour le liquide que nous venons de prendre comme exemple, puisque 0,95 pèse un kilogramme, la densité est $\frac{1}{0,95}$ ou $\frac{100}{95}$; elle s'obtient donc en divisant le nombre 100 par le degré du volumètre. Il suffit donc de construire une table donnant, pour les divisions successives du volumètre, les valeurs de ces quotients, c'est-à-dire les densités correspondantes : on peut ainsi marquer ces nombres sur l'instrument, qui prend alors le nom de *densimètre*.

ou du midi de la France, il est nécessaire de distiller jusqu'au trait $\frac{1}{2}$. C'est là, du reste, ce qu'il faut toujours faire quand on opère sur un vin dont on ne connaît pas *a priori* la richesse approximative.

(*) Une méthode analogue pourrait être employée pour graduer les volumètres destinés aux liquides moins denses que l'eau. — On préfère ordinairement la suivante : le lest ayant été réglé de façon que l'instrument plonge dans l'eau jusqu'à la naissance de la tige, et le nombre 100 ayant été marqué en ce point, on pèse l'instrument; on y ajoute ensuite momentanément une surcharge ayant, par exemple, un poids égal au quart du poids primitif; le rapport du poids primitif au poids actuel est le rapport de 4 à 5, et ce rapport est aussi celui des volumes d'eau déplacés. Donc, puisqu'on a marqué 100 au premier point d'affleurement, on doit marquer 125 au second; on partage l'intervalle en vingt-cinq parties égales et on prolonge la division jusqu'au haut de la tige.

CHAPITRE IV

PESANTEUR DE L'AIR ET DES GAZ. — BAROMÈTRE

114. Extension des principes de l'hydrostatique aux corps gazeux. — Les gaz se rapprochent des liquides par la fluidité, c'est-à-dire par la mobilité de leurs molécules, qui rend leur forme variable avec celle du vase qui les contient. Ils s'en distinguent seulement par leur facile compressibilité et par leur *force élastique* (28, 29). — Aussi tous les principes d'hydrostatique qui dépendent seulement de la mobilité des molécules sont-ils applicables aux gaz aussi bien qu'aux liquides.

115. Transmission des pressions dans les gaz. — Égalité de pressions en tous sens autour d'un point. — Le principe de la *transmission des pressions*, qui est le principe fondamental de l'hydrostatique (70), est applicable aux corps gazeux.

Si, par exemple, l'intervalle compris entre les deux pistons A et B de la figure 52 était occupé par un gaz, et si, le piston P ayant une surface 100 fois égale à celle du piston *p*, on venait à placer sur le petit piston un poids de 20 kilogrammes, et sur l'autre un poids de 2000 kilogrammes, l'équilibre s'établirait encore entre les deux pressions. Seulement, dans ce cas, les pistons s'enfonceraient d'abord d'une certaine quantité dans leurs cylindres, en raison de la compressibilité du gaz. — Une fois cette diminution de volume produite, la pression totale transmise au piston P, par l'intermédiaire du gaz, serait équivalente à 100 fois la pression exercée sur le piston *p*.

De ce principe, on déduit, pour les corps gazeux comme pour les liquides, et par le même raisonnement, le principe d'*égalité de pression dans tous les sens autour d'un point*.

116. L'air et les gaz sont pesants. — Pour démontrer que les gaz sont pesants, on peut faire l'expérience suivante, qui n'est qu'une modification d'une expérience de Galilée.

Dans un ballon de verre, fermé par un robinet, on fait le vide à l'aide de la machine pneumatique. On le suspend sous l'un des plateaux

d'une balance (fig. 99), et dans l'autre plateau on fait une tare. On ouvre alors le robinet, pour laisser rentrer l'air dans le ballon : on voit le fléau de la balance s'incliner du côté du ballon. Donc *l'air est pesant*.

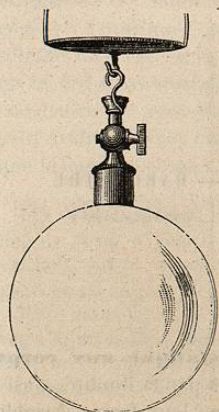


Fig. 99. — Démonstration de la pesanteur de l'air.

En laissant rentrer dans le ballon un gaz quelconque, on obtient un résultat semblable. Donc *tous les gaz sont pesants*.

Nous verrons plus loin (livre II, chapitre III) comment on peut déterminer avec exactitude le poids, ou plus exactement la masse, d'un volume déterminé d'un gaz : provisoirement, nous admettrons que le poids d'un litre d'air, sous la pression ordinaire, est environ 1^{er},5.

117. Condition d'équilibre d'un gaz pesant. — L'air et les gaz étant pesants, le raisonnement qui a été fait pour trouver la condition d'équilibre d'un liquide pesant (74) leur est applicable; par suite, *dans une masse gazeuse en équilibre, la pression doit être la*

même en tous les points d'un même plan horizontal.

L'atmosphère qui nous entoure nous fournit une masse gazeuse, d'une soixantaine de kilomètres de hauteur, dans laquelle nous pouvons étudier la pression en différents points. — C'est cette étude expérimentale que nous allons maintenant aborder.

118. Pression atmosphérique. — Expérience de Torricelli. — A l'époque où Galilée prouva que l'air est pesant, on expliquait encore par une hypothèse singulière un grand nombre de faits d'observation quotidienne, notamment l'ascension de l'eau dans les tuyaux des pompes aspirantes. On admettait que *la nature a horreur du vide*; que, partout où un vide tend à se produire, la nature tend à le combler. — Cependant, vers la même époque, des fontainiers de Florence remarquèrent que les pompes ne peuvent jamais aspirer l'eau à plus de 32 pieds de hauteur (environ 10 mètres) : l'ancienne hypothèse devenait donc insuffisante.

C'est à Torricelli, élève de Galilée, que revient l'honneur d'avoir prouvé que la cause réelle de ces phénomènes est la pression exercée par l'atmosphère sur la surface libre des liquides. Il pensa que, si cette pression ne peut soutenir qu'une colonne d'eau de 10 mètres de haut, elle ne doit pouvoir soutenir qu'une colonne de mercure de hauteur encore moindre, puisque le mercure est plus dense que l'eau.

Il emplit de mercure un tube de verre AB (fig. 400), long d'à peu près 1 mètre, et fermé en A; puis, bouchant l'autre extrémité B avec le doigt, il renversa le tube et le plongea par cette extrémité dans une

cuvette MN contenant du mercure. En retirant le doigt, il vit la colonne liquide conserver, au-dessus de la surface libre MN du mercure dans la

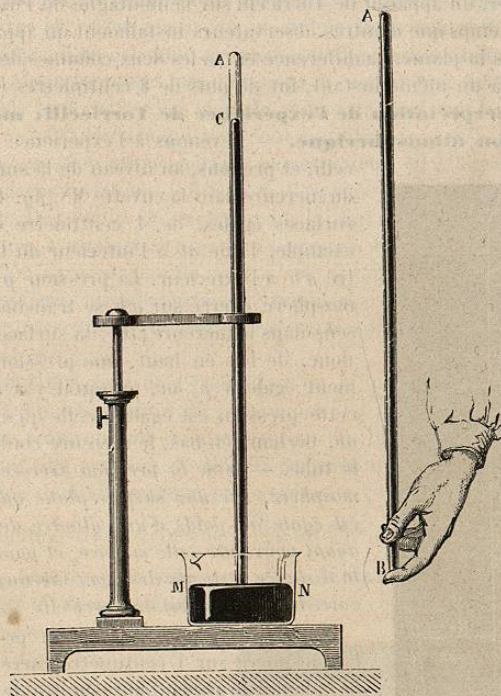


Fig. 400. — Expérience de Torricelli.

cuvette, une hauteur qui, avec nos mesures actuelles, est d'environ 76 centimètres.

119. Expériences de Pascal. — Pascal répéta l'expérience de Torricelli avec d'autres liquides, ayant une densité différente de celle du mercure. Il la répéta, par exemple, avec du vin. — Or le mercure a pour densité 13,6; la densité du vin est sensiblement la même que celle de l'eau, c'est-à-dire qu'elle est à peu près égale à 1. Pour produire le même effet que le mercure, la colonne de vin doit donc avoir une hauteur treize fois et demie plus grande, ou plus exactement $0^m,76 \times 13,6$, c'est-à-dire à peu près 10^m,53. Et, en effet, en opérant avec un tube suffisamment long, Pascal constata que le vin resta soutenu jusqu'à une hauteur d'environ 10 mètres, avec nos mesures actuelles.

Enfin, pour achever de rendre la démonstration concluante, Pascal remarqua que la pression atmosphérique doit aller progressivement en diminuant, à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère; par suite, la

hauteur du mercure dans l'appareil de Torricelli doit diminuer lorsqu'on le transporte sur une montagne. — Pascal fit installer, par son beau-frère Périer, un appareil de Torricelli sur la montagne du Puy de Dôme, en même temps que d'autres observateurs installaient un appareil semblable dans la plaine. La différence entre les deux colonnes de mercure, observées à un même instant, fut de plus de 8 centimètres (*).

120. Interprétation de l'expérience de Torricelli; mesure de la pression atmosphérique. — Revenons à l'expérience de Torricelli, et prenons, au niveau de la surface libre du mercure dans la cuvette MN (fig. 101), deux surfaces égales, de 1 centimètre carré par exemple, l'une *ab* à l'intérieur du tube, l'autre *a'b'* à l'extérieur. La pression *p* que l'atmosphère exerce sur *a'b'* se transmet en tous sens dans le mercure (70); la surface *ab* reçoit donc, de bas en haut, une pression précisément égale à *p*; or, puisqu'il y a équilibre, cette pression est égale à celle qu'exerce sur *ab*, de haut en bas, le mercure contenu dans le tube. — Donc la pression exercée par l'atmosphère, sur une surface plane quelconque, est égale au poids d'un cylindre de mercure ayant pour base cette surface, et pour hauteur la distance verticale des deux niveaux de mercure dans l'appareil de Torricelli.

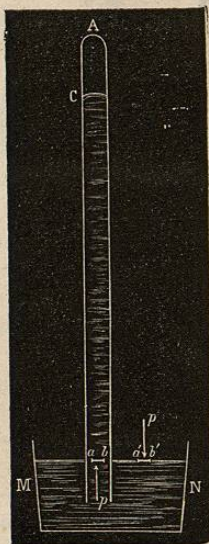


Fig. 101.

D'après cela, pour calculer la pression de l'atmosphère sur 1 centimètre carré, il suffit de calculer le poids d'un cylindre de mercure ayant 1^{cm.2} de base et 76^{cm.} de hauteur. Le volume de ce cylindre est de 76^{cm.3}; on obtiendra donc son poids en grammes, en multipliant la densité du mercure 13,6 par 76; on trouve ainsi 1033^{gr.},6, ou 1^{kg.},0336. — Si l'on veut faire usage du système C. G. S., et évaluer en dynes la pression atmosphérique sur un centimètre carré, on remarquera que cette pression est égale au poids d'une masse de 1033^{gr.},6 de mercure; comme, à Paris, le poids d'un gramme est 981 dynes, la pression atmosphérique est donc égale à 1033,6 × 981 = 1 015 000 dynes, ou environ une mégadyne.

(*) Pascal avait fait lui-même une première expérience à Paris, au sommet de la tour Saint-Jacques; il avait constaté que la hauteur de la colonne de mercure était un peu moindre au sommet de la tour qu'au pied (la différence était d'environ 4 millimètres et demi). Il avait pensé alors qu'on obtiendrait une différence bien plus considérable en opérant sur un lieu beaucoup plus élevé, comme le Puy de Dôme. — C'est en mémoire de ces expériences, qu'on a placé la statue de Pascal sous la voûte qui supporte la tour Saint-Jacques.

121. Évaluation des pressions en hauteurs de mercure. — On vient de voir que la hauteur de la colonne de mercure, dans le tube de Torricelli, varie avec l'altitude à laquelle se trouve l'appareil dans l'atmosphère; elle varie aussi, en un même lieu, aux différents instants du jour: il en est donc de même de la pression atmosphérique. Or, si l'on rapporte toutes ces pressions à une même surface, il est clair qu'elles sont entre elles dans le même rapport que les hauteurs des colonnes de mercure qui leur font équilibre. — Aussi, au lieu de désigner la pression atmosphérique par sa valeur en kilogrammes (ou en dynes, avec le système C. G. S.), on l'exprime ordinairement par la hauteur de la colonne de mercure qui lui fait équilibre. On dit, par exemple, que, à un instant donné, la pression est de 75 centimètres: cette locution abrégée signifie que, à cet instant, la pression exercée par l'atmosphère, sur une surface déterminée, est égale au poids d'une colonne de mercure ayant pour base cette surface et pour hauteur 75 centimètres (*).

Si l'on voulait passer de l'évaluation de la pression en hauteur de mercure, à une évaluation de la pression en poids sur une surface donnée, on remarquerait qu'une hauteur de 76 centimètres de mercure produit une pression de 1^{kg.},033 par centimètre carré; par suite, une pression de 1 kilogramme par centimètre carré serait représentée par une hauteur de mercure de $\frac{76}{1,033}$ ou 73^{cm.},5.

122. La hauteur de mercure dans le tube de Torricelli mesure aussi la force élastique de l'air. — Isolons par la pensée,

dans le lieu même où est placé le tube de Torricelli, une couche d'air comprise entre deux plans horizontaux peu distants AB et CD (fig. 102). Cette couche supporte la pression de l'atmosphère, à la fois de haut en bas sur le plan AB, et de bas en haut sur le plan CD. Ces pressions tendent à rapprocher les deux plans; donc, si l'équilibre existe, c'est que la force élastique du gaz compris entre les deux plans est égale à la pression atmosphérique elle-même. — On dit alors, en employant une locution abrégée qui doit être interprétée comme la précédente (121), que la force élastique de l'air est de 75 centimètres.

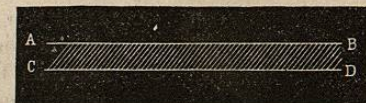


Fig. 102.

(*) Cependant, si les pressions que l'on veut comparer s'exercent en des lieux différents, elles ne sont plus dans le même rapport que les hauteurs des colonnes de mercure qui leur font équilibre. Soient H et H' ces hauteurs; *g* et *g'* les intensités de la pesanteur aux deux points considérés; P et P' les pressions sur un centimètre carré, et D la densité de mercure. On a :

$$P = HDg, \quad P' = H'Dg' \quad \text{et par suite} \quad \frac{P}{P'} = \frac{H}{H'} \frac{g}{g'}$$

On conçoit ainsi comment la hauteur de la colonne mercurielle est la même, soit qu'on place l'appareil de Torricelli dans une chambre close, soit qu'on le place à l'extérieur, puisque la force élastique de l'air de la chambre est égale à celle de l'air extérieur.

125. **Effets produits par la pression atmosphérique. — Crève-vessie, hémisphères de Magdebourg.** — On peut rendre manifestes les effets de la pression atmosphérique par les expériences suivantes.

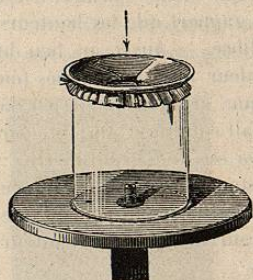


Fig. 103. — Crève-vessie.

L'expérience du *crève-vessie* (fig. 103) consiste à placer, sur la platine de la machine pneumatique, un cylindre de verre, ouvert à ses deux extrémités, et sur l'ouverture supérieure duquel on a tendu une membrane de vessie. Tant qu'on ne fait pas fonctionner la machine, la membrane reste plane, malgré la pression qu'elle supporte de la part de l'atmosphère, parce que la force élastique de l'air intérieur exerce sur elle une pression égale de bas en haut; mais, dès les premiers coups de piston qui diminuent cette force élastique, la membrane s'infléchit, et bientôt elle se brise sous l'effort de la pression atmosphérique.

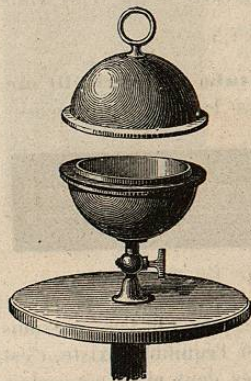


Fig. 104.
Hémisphères de Magdebourg.

Les *hémisphères de Magdebourg* (fig. 104) sont deux hémisphères métalliques creux dont les bords peuvent s'appliquer exactement l'un sur l'autre; une bande de cuir graissé rend la fermeture encore plus hermétique. L'hémisphère inférieur porte un robinet, qui peut se visser sur le conduit de la machine pneumatique. — Les deux hémisphères étant superposés, on fait le vide dans l'intérieur, et l'on ferme le robinet. La pression que l'atmosphère exerce normalement à chacun des éléments de la sphère, n'étant plus équilibrée par la force élastique de l'air intérieur, maintient les hémisphères appliqués l'un contre l'autre : deux personnes, tirant en sens opposé, ne peuvent les séparer. Dès qu'on ouvre le robinet, on entend un sifflement qui annonce la rentrée de l'air, et l'on sépare les hémisphères sans difficulté. — Dans une expérience exécutée à Magdebourg par Otto de Guericke, vingt chevaux ne purent parvenir à séparer deux hémisphères d'un diamètre assez considérable, dans lesquels on avait fait le vide.

124. **Effets de la pression atmosphérique sur nos organes.**

— La pression de l'atmosphère n'a pas, en général, d'effet sensible sur nos organes, bien que cette pression ait une valeur d'environ 103 kilogrammes par décimètre carré (120). Les cavités de l'organisme sont occupées, ou par des liquides qui sont incompressibles, ou par des gaz dont la force élastique a pris une valeur égale à la pression atmosphérique : cette pression, tant qu'elle demeure constante, ne peut donc, ni tendre à diminuer le volume de notre corps, ni en gêner les mouvements.

Nous éprouvons, au contraire, une gêne extrême quand la pression extérieure vient à diminuer ou à augmenter notablement, parce qu'il n'y a plus équilibre entre la force élastique du gaz intérieur et la pression extérieure. C'est l'effet que produisent sur nous les variations de la pression atmosphérique, quand elles atteignent une valeur un peu grande. — Ce sont encore des effets de ce genre qui se manifestent, avec exagération, sur les aéronautes qui s'élèvent à des hauteurs considérables, ou sur les ouvriers qui travaillent, à d'assez grandes profondeurs, sous l'eau, dans des appareils à air comprimé.

125. **Baromètre à cuvette.** — L'appareil de Torricelli, disposé de manière à permettre de mesurer avec précision la pression atmosphérique, prend le nom de *baromètre à cuvette*.

Pour que les indications de l'instrument soient exactes, il faut que

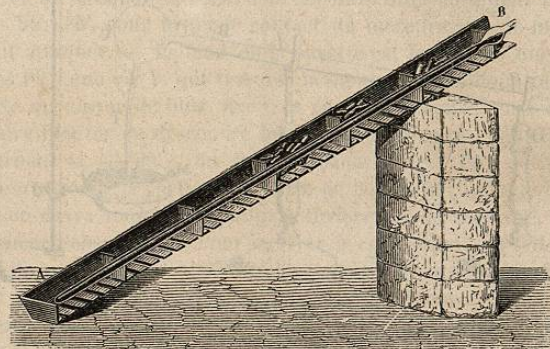


Fig. 105.

la partie supérieure du tube, ou *chambre barométrique*, ne contienne aucun gaz ni aucune vapeur, dont la force élastique puisse déprimer la colonne mercurielle. — Après s'être procuré du mercure bien pur (*), on fait choix d'un tube de 85 à 90 centimètres de longueur (fig. 105);

(*) Le mercure récemment expédié de la mine est, en général, tout à fait pur. Celui qui a déjà servi dans les laboratoires contient souvent un peu d'oxyde et des traces de métaux étrangers : on le débarrasse de ces impuretés, en l'agitant à plusieurs reprises avec de l'acide azotique, lavant ensuite à grande eau, puis séchant avec du papier buvard, et filtrant à travers des entonnoirs de verre effilés.

on le ferme à l'une de ses extrémités A, et l'on soude une boule B à l'autre extrémité. On emplit ce tube de mercure, puis on le couche sur une grille inclinée; on place des charbons ardents sur cette grille, de manière à faire bouillir successivement et avec précaution toutes les parties de la colonne. Dans cette opération, l'humidité et les bulles d'air qui étaient restées adhérentes à la paroi du tube sont chassées; la boule B sert à empêcher la projection du mercure pendant l'ébullition. — Lorsque la surface du mercure paraît brillante dans toute la longueur du tube, on enlève les charbons et on laisse refroidir: on détache ensuite la boule, on bouche avec le doigt l'extrémité ouverte, et on installe le tube dans la cuvette. — Une fois l'appareil construit, on reconnaît que le tube a été bien purgé d'air et d'humidité, en inclinant jusqu'à ce que le mercure en atteigne le sommet; si le liquide produit un bruit sec, en frappant le sommet du tube, on peut admettre que l'appareil est construit dans des conditions satisfaisantes.

L'ébullition du mercure est toujours une opération difficile à effectuer sans briser le tube, pour peu qu'il ait un assez grand diamètre. On procède alors comme il suit. — A l'extrémité B du tube on soude un petit ballon de verre C (fig. 106), présentant, d'une part un petit

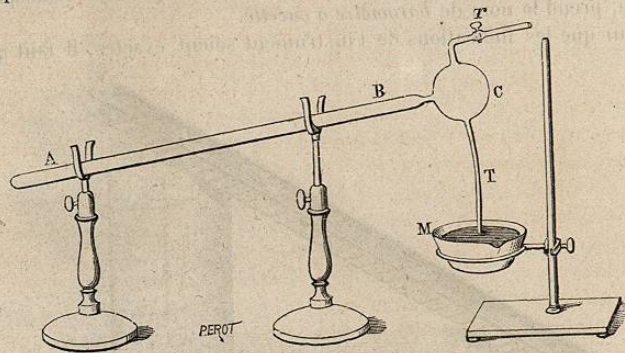


Fig. 106.

tube T terminé par une pointe très effilée et fermée à la lampe, d'autre part un tube muni d'un robinet *r*, par lequel il est mis en communication avec une pompe à mercure (175). On chauffe le tube AB, et on y fait le vide; l'humidité est chassée. On introduit alors la pointe effilée T dans un vase M contenant du mercure chauffé au-dessus de 100°, et on brise la pointe. Le mercure pénètre lentement dans le ballon, puis dans le tube AB. La pointe effilée doit être assez fine pour que le remplissage du tube dure deux heures. Lorsque le tube est plein, on ouvre le robinet *r*, on détache la boule C, et on termine l'opération comme il a été dit plus haut.

126. **Baromètres usuels à cuvette.** — Dans les baromètres d'appartement, la cuvette et le tube sont fixés sur une planche de bois: une division en millimètres, dont le zéro est au niveau du liquide dans la cuvette, sert à mesurer la hauteur de la colonne de mercure.

Dans ces baromètres, on admet que le niveau du mercure dans la cuvette demeure invariable. Cependant, chaque fois que la colonne monte dans le tube, le niveau s'abaisse dans la cuvette, et réciproquement; ce niveau cesse alors de correspondre au zéro de la graduation. Cet inconvénient peut être atténué en donnant à la cuvette une large surface (fig. 107). La cuvette est fermée par une peau de chamois qui donne passage à l'air, tout en empêchant la poussière de pénétrer.

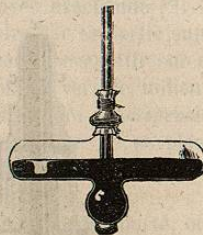


Fig. 107.

127. **Baromètre de Fortin.** — Le baromètre de Fortin est un baromètre à cuvette, qui offre le double avantage de permettre une grande précision dans les mesures et d'être facilement transportable.

La cuvette est formée par un cylindre de verre, assujéti entre deux montures métalliques (fig. 108). La figure 109, qui représente une coupe de la partie inférieure de ce baromètre, montre que les deux montures métalliques NN, MM, sont garnies intérieurement de pièces de buis BB, B'B', pour éviter le contact du mercure avec le métal qu'il pourrait attaquer. — Le fond de la cuvette est formé par une peau de chamois PP; une vis V, qui traverse la monture métallique inférieure, supporte un disque de buis, fixé à la peau de chamois, en sorte qu'on peut faire monter ou descendre le niveau du mercure dans la cuvette en tournant la vis dans un sens ou dans l'autre. Une petite pointe d'ivoire *a*, fixée à la partie supérieure de la cuvette, indique le niveau auquel on devra toujours amener la surface *mn* du mercure, avant de commencer l'observation. Pour arriver à ce résultat, on fait mouvoir la vis V jusqu'à ce que l'extrémité de la pointe *a* paraisse exactement son image, vue par réflexion dans le mercure.

Le tube du baromètre est fixé dans l'ouverture CC, que présente la cuvette à sa partie inférieure, au moyen d'une peau de chamois qu'il traverse: cette peau est serrée, par des fils, d'une part sur le tube, dans un étranglement ménagé à cet effet, d'autre part sur un rebord saillant de la garniture de buis. La flexibilité et la perméabilité de la peau permettent à la pression atmosphérique de s'exercer librement à la surface du mercure dans la cuvette. — Sur la gaine de laiton qui entoure le tube de verre dans toute sa longueur, est tracée une échelle divisée en millimètres ou en demi-millimètres, dont le zéro correspondrait à l'extrémité de la pointe d'ivoire *a*. Deux fentes, pratiquées dans la longueur de la gaine et opposées l'une à l'autre, permettent d'aper-