tée par la tige, est divisée en 100 parties, dont chacune représente un centième d'alcool en volume : le degré 0 correspond à l'eau pure, et le degré 100 à l'alcool absolu. Plongé dans un liquide spiritueux à la température de 15°, l'alcoomètre en donne immédiatement la force, parce que la graduation a été faite à cette température. Par exemple, si à 15° l'alcoomètre s'enfonce dans une eau-de-vie jusqu'à la division 48, cela indique que cette eau-de-vie contient 48 centièmes de son volume d'alcool pur et le reste d'eau.

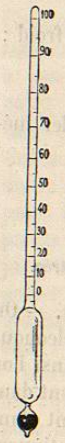


Fig. 191.

Graduation. — On établit l'échelle de l'alcoomètre en plongeant successivement l'instrument dans des mélanges d'alcool et d'eau faits dans des proportions connues, à la température fixe de 15°. Cette opération demande des précautions particulières, à cause du phénomène suivant.

Lorsqu'on mélange un volume V d'alcool absolu avec un volume V′ d'eau pure, le volume total V″, qui devrait être égal à V + V′, est plus petit que V + V′. Il y a donc eu une contraction, laquelle est égale à (V + V′) — V″. De plus, cette contraction est variable avec les volumes V et V′ qui sont mélangés. La contraction est maximum pour un mélange de 52,5 parties d'alcool et de 47,7 d'eau (en volume), et elle est alors égale à 3,65 pour 100. Il faut donc en tenir compte dans la graduation.

Pour cela, on prend une éprouvette à pied, graduée en 100 parties égales, et y ayant versé de l'alcool absolu jusqu'à la division 95, on achève de la remplir jusqu'à 100 avec de l'eau distillée : on obtient ainsi un mélange qui contient certainement, 95 pour 100 d'alcool absolu, et si l'on y plonge l'instrument, il est légitime de marquer 95 au point d'affleurement. On vide alors l'éprouvette, on y verse de l'alcool jusqu'à 90, et l'on achève encore de remplir jusqu'à 100 avec de l'eau distillée : cela donne évidemment un mélange qui contient 90 pour 100 d'alcool absolu; on peut donc marquer 90 au point d'affleurement de l'alcoomètre dans cette dernière liqueur. On détermine de la même manière tous les degrés, de 5 en 5, depuis 90 jusqu'à la division 5. Enfin, l'on marque 100° dans l'alcool absolu et 0° dans l'eau pure; on divise en cinq parties égales chacun des intervalles de 5 en 5, et l'instrument est gradué.

Remarques. — 1° Il importe d'observer que, l'alcoomètre de Gay-Lussac ayant été gradué à 15°, ce n'est qu'à cette température que ses indications sont exactes. A des températures plus hautes ou plus basses, les liquides alcooliques se dilatent ou se contractent et deviennent, par conséquent, plus légers ou plus denses : de sorte que l'instrument s'y enfonce plus ou moins, bien que

leur richesse en alcool n'ait pas varié. Entre 0° et 30° C., l'erreur ainsi commise peut aller jusqu'à 30 pour 100 de la force de la liqueur.

Table de correction. — On peut corriger cette erreur à l'aide d'une table de correction, construite par Gay-Lussac. C'est une table à double entrée qui contient dans une colonne verticale les températures de zéro à 30°, et dans une colonne horizontale les degrés de l'alcoomètre de zéro à 100. On se sert de cette table comme de la table de multiplication ordinaire : au point de rencontre de la verticale abaissée de la case qui contient les degrés alcoométriques avec l'horizontale qui part de la case où sont les degrés du thermomètre, se trouve le nombre qui indique la richesse réelle du liquide spiritueux. Par exemple, une eau-de-vie étant à la température de 22°, et l'alcoomètre y marquant 36, on trouve dans la table que la richesse réelle de cette liqueur est 33 : c'est-à-dire qu'elle contient les 33 centièmes de son volume d'alcool, et, par suite, 67 centièmes d'eau.

Formule de correction. — On peut aussi faire cette correction à l'aide d'une formule empirique, qui comprend tous les nombres inscrits dans la table. En appelant x le degré cherché, n le degré observé à la température de l'expérience $(15 + \theta)$, et b un coefficient, qui est égal à 0,4, on a

$$x = n - b\theta.$$

Si la température de l'expérience est inférieure à 15°, on commet une erreur par défaut, et la correction doit être négative. Le degré corrigé x est alors

$$x = n + b\theta.$$

2° Les indications de l'alcoomètre de Gay-Lussac ne se rapportent qu'à des mélanges d'alcool et d'eau; par conséquent, si l'on plongeait directement l'instrument dans du vin, il n'en donnerait pas la richesse alcoolique, à cause des substances étrangères que ce liquide renferme; mais si, par une distillation préalable, on sépare de ces substances l'alcool du vin, l'alcoomètre devient applicable. Plus tard, à propos de la *distillation*, nous dirons comment on effectue cette séparation, à l'aide d'un petit alambic construit par M. Salleron.

180. **Extension de la graduation centésimale aux pèse-sels, pèse-lait, pèse-vins, pèse-urine.** — On construit aussi des pèse-sels gradués d'après le principe de l'alcoomètre centésimal. Ces instruments permettent de déterminer immédiatement la quantité de tel ou tel sel qui est contenue dans une certaine dissolution. Leur zéro correspond toujours à l'eau pure. On marque successivement 5, 10, 15, 20... aux différents points d'affleurement dans des dissolutions qui contiennent 5, 10, 15, 20... parties de sel; puis on divise chaque intervalle en 5 parties égales.

Ce mode de graduation offre un inconvénient : c'est qu'il faut un pèse-sels spécial pour chaque espèce de sel. Un instrument qui aurait été gradué pour l'azotate de potasse, par exemple, donnerait des indications complètement fausses dans une dissolution de carbonate de potasse ou de tout autre sel.

On construit d'après le même principe des *pèse-lait* et des *pèse-vins*, destinés à mesurer la quantité d'eau qu'on peut avoir introduite par fraude dans ces liquides; mais ces instruments ne présentent pas une utilité réelle, parce que, les densités du lait et du vin étant très variables, même lorsque ces liquides sont parfaitement naturels, on pourrait attribuer à la fraude ce qui serait dû uniquement à la mauvaise qualité naturelle du lait ou du vin. Plusieurs médecins font aussi usage du *pèse-urine*, fondé sur le même principe.

181. **Graduation par comparaison.** — Pour tous les aréomètres centésimaux d'une même catégorie, par exemple pour tous les alcoomètres, il est

inutile de répéter la série des opérations que comporte la graduation de Gay-Lussac; il suffit de graduer empiriquement, par la méthode indiquée, un étalon de chaque espèce; on peut ensuite graduer les autres par comparaison.

Principe de la méthode. — Cette méthode de graduation est fondée sur ce fait que *les échelles de deux alcoomètres* (ou de deux aréomètres centésimaux de même espèce) *sont semblables.* Cela veut dire que le *rapport des capacités* u et u_1, qui correspondent à la longueur de 1 degré dans chaque échelle, est un nombre constant.

Ce fait est une conséquence directe des conditions d'équilibre des corps flottants. En effet, soient deux aréomètres de poids P et P_1, qu'on suppose gradués l'un et l'autre par la méthode de Gay-Lussac : ces deux instruments doivent marquer le même degré N lorsqu'on les plonge dans un même liquide de densité d. L'équation d'équilibre sera,

pour le premier $$P = Nud,$$

et pour le second $$P_1 = Nu_1 d.$$

En divisant ces deux équations membre à membre, il vient

$$\frac{P}{P_1} = \frac{u}{u_1}.$$

Le rapport des degrés $\frac{u}{u_1}$ étant constant pour deux instruments de poids P et P_1, il en résulte nécessairement que les deux échelles sont semblables.

Opération. — La graduation se fera très simplement en utilisant cette similitude, à la condition toutefois de supposer les tiges des instruments par-

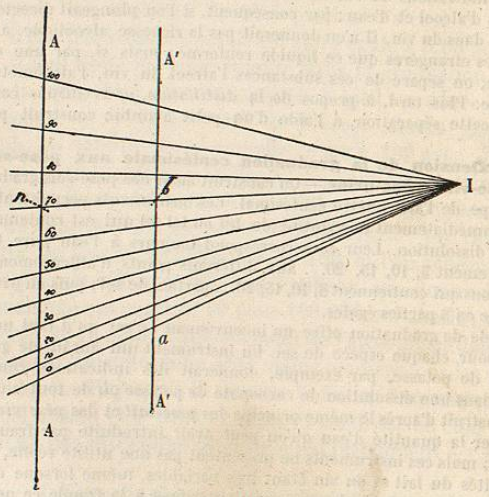


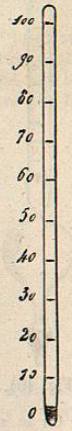
Fig. 192.

faitement calibrées, car alors la division en parties de capacités semblables se ramènera à une division en parties de longueurs semblables. On commen-

cera par porter l'échelle AA de l'étalon sur une feuille de papier (fig. 192), puis d'un point I quelconque on mènera un système de transversales allant aux divers degrés de l'échelle-type. Cette construction graphique préliminaire servira à la graduation de tous les instruments de même espèce.

Pour l'un quelconque de ces instruments, on déterminera directement le degré 0; puis le degré n, en le plongeant successivement dans l'eau pure, puis dans une dissolution qui marque n à l'aréomètre étalon. Soit ab cet intervalle $(0 - n)$ sur l'instrument à graduer; il a une capacité égale à nu_1; de même l'intervalle $(0 - n)$ sur l'étalon a une capacité égale à nu : en comparant ces deux intervalles $\frac{nu}{nu_1}$, on aura le rapport de similitude cherché $\frac{u}{u_1}$. Cette comparaison s'opère graphiquement de la manière suivante : On cherche sur la feuille de papier une parallèle A'A' à AA, qui ait, entre les transversales I0 et In, une longueur précisément égale à ab : cette parallèle A'A' sera évidemment divisée, par le système de transversales, en parties proportionnelles au rapport $\frac{u}{u_1}$, et elle représentera exactement l'*échelle cherchée.*

182. **Densimètres et volumètres.** — 1° *Définition.* — On appelle ainsi des aréomètres à poids constant qui sont gradués rationnellement, de manière à indiquer tout de suite soit les *densités* des liquides où on les plonge, soit leurs *volumes spécifiques* c'est-à-dire les *volumes de l'unité de poids* de ces liquides. Ces instruments ont été imaginés par Gay-Lussac. Leur forme est analogue à celle des aréomètres de Beaumé; mais il est très important que leurs tiges soient le mieux calibrées possible.



Fgi. 193.

2° *Principe de la graduation.* — Supposons que l'on marque 100 au point d'affleurement de l'instrument (fig. 193) dans l'eau pure à 4°. Ce point est considéré comme le 100e degré d'une division en parties d'égale capacité, dont le zéro serait à la partie inférieure de l'instrument; celui-ci est supposé parfaitement cylindrique, de manière que les parties d'égale longueur aient la même capacité. Soit u le volume d'une division, et soit P le poids total de l'instrument, on a évidemment

[1] $$P = 100\,u.$$

Si l'on plonge l'instrument dans un liquide quelconque, de densité x, et qu'il s'y enfonce jusqu'au degré N, on aura

[2] $$P = Nux.$$

Donc 1° le volume occupé par un poids P du liquide sera Nu et le *volume spécifique* y du liquide sera donné par l'équation

$$y = \frac{Nu}{P} = \frac{Nu}{100\,u} = \frac{N}{100};$$

2° la densité du liquide sera donnée par l'équation

$$100\,u = Nux, \quad \text{d'où} \quad x = \frac{100}{N}.$$

Remarque. — Si, au lieu d'eau pure à 4°, on avait pris de l'eau pure à t°, ce qui est le cas ordinaire, il n'y aurait pas d'autres changements que l'introduction du facteur e, densité de l'eau, dans l'équation [1] et dans ses conséquences. On aurait

$$P = 100\,ue \quad \text{et} \quad x = \frac{100\,e}{N},\ y = \frac{N}{100\,e}.$$

1° *Opération.* — On opère cette graduation de deux manières un peu différentes, suivant qu'on destine le densimètre aux liquides plus denses que l'eau ou bien aux liquides moins denses.

I. On leste l'appareil de manière que dans l'eau pure à 4° il plonge jusqu'en un point A (fig. 194) situé à l'extrémité supérieure de la tige. Si l'appareil était réduit à un tube cylindrique, bien calibré, comme celui de la figure 193, ce point fixe unique suffirait pour en établir l'échelle, ainsi qu'il a été dit ci-dessus. Mais on préfère habituellement à la forme exclusivement cylindrique la forme des aréomètres ordinaires, qui présentent une partie renflée, surmontée d'une tige cylindrique (fig. 194). Il est nécessaire, dans ce cas, de déterminer un deuxième point fixe, afin d'établir la division en 100 parties égales, sans jauger la partie renflée. Pour cela, on choisit un liquide dont la densité soit connue et plus grande que celle de l'eau dans le rapport de 4 à 3, par exemple ; on y plonge l'instrument, qui n'entre plus que jusqu'à un certain point B de la tige Soient V et v les volumes immergés successivement dans l'eau et dans le second liquide ; on a les deux équations suivantes, qui correspondent aux deux équilibres successifs

$$P = V \quad \text{et} \quad P = vD,$$

d'où l'on déduit

$$\frac{v}{V} = D = \frac{3}{4} \quad \text{et} \quad v = \frac{3}{4}V.$$

Si donc on représente par 100 le volume V, le volume v le sera par 75. En conséquence, on inscrit les nombres 100 et 75 respectivement aux points A et B ; on partage la distance AB en 25 parties égales (chacune de ces parties est $\frac{1}{25}$ de AB, ou $\frac{1}{100}$ de V, c'est-à-dire du volume immergé dans l'eau pure) ; enfin on continue les divisions jusqu'à la partie inférieure de la tige : celle-ci doit être assez longue pour descendre environ jusqu'au degré 50.

Fig. 194.

On se sert ensuite de l'instrument comme on l'a indiqué ci-dessus. Pour avoir la densité d'un liquide, on note la division n, où affleure l'aréomètre dans ce liquide : on a alors $d = \frac{100}{n}$. S'il affleure, par exemple, au degré 54 dans de l'acide sulfurique non concentré, la densité de cet acide sera $\frac{100}{54} = 1{,}85$

Quant au *volume spécifique*, il serait donné, au contraire, par la formule $\frac{n}{100}$: pour le même acide sulfurique, le volume spécifique serait 0,54.

II. Dans le cas des liquides moins denses que l'eau, il faut lester l'instrument de manière que l'affleurement, dans l'eau distillée à 4°, ait encore lieu vers le bas de la tige : on marque 100° en ce point, en supposant que le degré 0 de l'échelle corresponde au point le plus bas du réservoir de l'instrument.

L'équation d'équilibre est toujours

$$100\,u = P.$$

On le plonge ensuite dans un liquide de densité connue, égale, par exemple, à 0,80. Il s'y enfonce davantage et affleure à un degré N tel, que l'on ait

$$Nu\frac{80}{100} = P, \quad \text{d'où} \quad Nu\frac{80}{100} = 100\,u, \quad \text{d'où} \quad N = 125.$$

On devra donc y marquer 125. On divisera l'intervalle en 25 parties égales et l'on prolongera la division jusqu'au sommet de la tige (environ jusqu'au degré 150).

Remarque. — On voit que ce dernier procédé ne diffère du précédent que par la place qu'on donne au degré 100. On pourrait construire un volumètre qui servirait à la fois pour les liquides plus denses et pour les liquides moins denses que l'eau : il suffirait de le lester de manière que le point 100 fût placé vers le milieu de la tige : la moitié inférieure de la tige porterait les divisions inférieures à 100 pour les liquides plus denses, et la moitié supérieure les divisions supérieures à 100 pour les liquides moins denses que l'eau.

4° *Procédé de graduation de Despretz.* — Despretz graduait les volumètres à l'aide d'un procédé qui peut s'appliquer aussi bien aux liquides plus denses qu'aux liquides moins denses que l'eau. Pour ces derniers, par exemple, on opère de la manière suivante :

On leste l'instrument de manière qu'il s'enfonce dans l'eau pure à 4° jusqu'au bas de la tige et l'on marque 100, comme ci-dessus, à ce point d'affleurement. On attache ensuite à l'extrémité supérieure de la tige un poids qui soit le quart de celui de l'instrument ; puis on remet le tout dans l'eau pure. Or, la première équation d'équilibre étant

$$100\,u = P,$$

la seconde sera, en appelant N le nouveau point d'affleurement,

$$Nu = \frac{5}{4}P.$$

En divisant membre à membre ces deux équations, il vient

$$\frac{N}{100} = \frac{5}{4}, \quad \text{d'où} \quad N = 125.$$

On inscrit donc ce dernier nombre en regard du nouveau point d'affleurement, puis on divise l'intervalle des points 100 et 125 en 25 parties égales, et l'on continue l'échelle jusqu'au sommet de la tige.

Pour les liquides plus denses que l'eau, on lestera l'instrument de manière qu'il s'enfonce dans l'eau pure jusqu'au sommet de la tige, et l'on marquera 100 à ce point d'affleurement. Puis on *diminuera* le poids total d'une fraction égale à un quart de sa valeur, et on le plongera de nouveau dans l'eau pure Il affleurera en un point N, qui sera fourni par les équations

$$100\,u = P \quad \text{et} \quad Nu = \frac{3}{4}P, \quad \text{d'où} \quad N = \frac{3}{4}100 = 75.$$

On inscrira ce nombre au point d'affleurement, et l'on achèvera la graduation comme ci-dessus.

5° *Différence entre les densimètres et les volumètres.* — Tous ces instru-

ments, ainsi gradués, sont, à proprement parler, des *volumètres*. En effet, ils donnent directement, à première vue, le *volume spécifique* des liquides où ils sont immergés, puisqu'on a $y = \frac{n}{100}$. Au contraire, il faut faire un calcul pour avoir la densité du liquide, puisqu'il faut appliquer la formule $x = \frac{100}{n}$. Pour transformer les volumètres en densimètres, il suffit d'effectuer d'avance le calcul de la formule $x = \frac{100}{n}$, pour tous les degrés de l'échelle volumétrique, et d'inscrire la densité correspondante en face de chaque degré. L'instrument donnera alors, par une simple lecture, la densité du liquide où on l'aura plongé : ce sera un *densimètre*.

183. **Utilisation des aréomètres de Baumé comme volumètres et densimètres.** — *Module d'un aréomètre.* — Les aréomètres de Baumé, de Cartier, et, en général, tous les aréomètres à poids constant, munis d'une tige cylindrique bien calibrée et divisée en degrés égaux, peuvent servir de *volumètres* et de *densimètres*. Tels qu'ils sont, en effet, ce sont des volumètres à graduation arbitraire.

Module ou *valeur volumétrique du degré.* — Soit V le volume total de l'instrument, et v la capacité d'une division. On appelle *module* de l'aréomètre le rapport $\frac{v}{V}$: ce rapport caractérise l'échelle de l'aréomètre, il fixe la *valeur volumétrique* du degré. La première chose à faire, c'est de le déterminer. Pour cela, il suffit de connaître la densité des liquides qui ont servi à déterminer les points fixes. Considérons, par exemple, le pèse-acides de Baumé. Le degré 0° est au sommet de la tige; il est l'origine d'une échelle en parties d'égale capacité, qui est censée se prolonger jusqu'au bas de l'instrument, mais qui, en réalité, ne va que jusqu'à l'extrémité inférieure de la tige, au 70e degré environ. L'affleurement dans l'eau pure (à 12°,5), qui a fixé le degré 0°, donne l'équation d'équilibre

$$[1] \qquad P = Ve,$$

en appelant P le poids total de l'aréomètre et e la densité de l'eau à 12°,5 ($e = 0{,}99949$). De même, l'affleurement dans la dissolution saline, lequel a fixé le degré 15°, donne l'équation d'équilibre

$$[2] \qquad P = (V - 15v)\, d,$$

en appelant d la densité connue de la solution saline de Baumé ($d = 1{,}116$). En combinant ces deux équations, il vient

$$Ve = (V - 15v)\, d, \qquad \text{d'où} \qquad \frac{v}{V} = \frac{d - e}{15d} = \left(\frac{117}{16740}\right).$$

Application. — Posons ce module égal à μ. Connaissant le module μ de l'instrument, on peut utiliser celui-ci soit comme volumètre, soit comme densimètre. En effet, plongeons-le dans un liquide quelconque, dont le volume spécifique soit y et la densité x. L'affleurement aura lieu à un certain degré n qu'on lit sur l'échelle. L'équation d'équilibre est

$$[3] \qquad (V - nv)\, x = P$$

ou, en remplaçant P par sa valeur tirée de l'équation [1],

$$(V - nv)\, x = Ve,$$

et en divisant les deux membres par V, afin d'introduire le module μ,

$$\left(1 - n\frac{v}{V}\right) x = e, \qquad \text{d'où} \qquad x = \frac{e}{1 - n\mu}.$$

Quant au volume spécifique y, on l'obtient en remarquant qu'un poids P du liquide correspond à un volume déplacé $(V - nv)$, et que, par suite, un poids 1 correspond au volume

$$\frac{(V - nv}{P} = \frac{V - nv}{Ve} = \frac{1 - n\mu}{e} = y.$$

Remarque. — On aurait pu poser cette formule immédiatement, sachant qu'on a, par définition,

$$y = \frac{1}{x}.$$

APPLICATIONS DIVERSES.

184. **Niveau d'eau.** — *Principe et description.* — Le *niveau d'eau* est un instrument d'arpentage, dont la construction est fondée sur les conditions d'équilibre d'un liquide pesant contenu dans des vases communiquants. Il se compose d'un tube de fer-blanc ou de laiton, coudé à ses deux extrémités ; à celles-ci sont adaptés deux tubes de verre D et E (fig. 195). Tout l'appareil est disposé

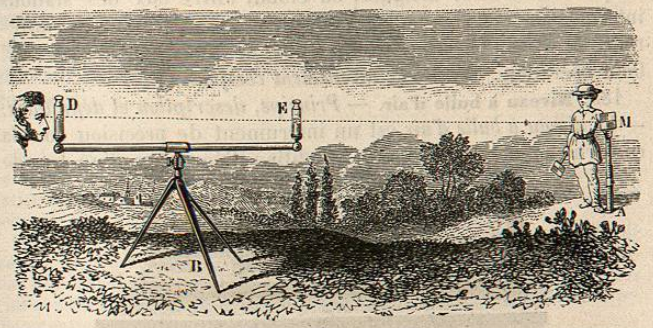


Fig. 195.

horizontalement sur un pied à trois branches, et l'on y verse de l'eau colorée jusqu'à ce que le liquide s'élève dans les deux fioles de verre jusqu'aux 3/4 environ de leur hauteur. L'équilibre étant établi, d'après le principe des vases communiquants les surfaces libres du liquide, en D et en E, sont dans un même plan horizontal.

Usage. — Cet instrument sert à *prendre des nivellements*, c'est-à-dire à déterminer la *différence de niveau* entre deux points, ou, autrement dit, leur distance verticale. Par exemple, si l'on veut trouver de combien un point B du sol est au-dessus d'un autre point A, on place en ce dernier point une *mire*. C'est une règle de bois formée de deux tiges à coulisse, et terminée par une plaque de fer-blanc M, qu'on appelle le *voyant*, et qui porte à son centre un point de repère. Cette mire étant disposée verticalement en A, un observateur, placé près du niveau, dirige, tangentiellement aux surfaces D et E, un rayon visuel vers la mire, et fait signe à un aide, qui la tient, de l'allonger ou de la raccourcir jusqu'à ce que le point de repère se trouve sur le prolongement de la ligne DE. Transportant alors la mire au point B, on répète la même opération. La distance entre la deuxième position de la mire et la première position mesure la distance verticale des points A et B.

On peut encore opérer en plaçant le niveau dans un lieu intermédiaire entre les deux points. On vise une mire placée successivement en ces deux points, et la différence des hauteurs du voyant, dans les deux visées, donne la distance verticale des deux points.

L'une ou l'autre de ces opérations constitue le *nivellement simple*. Elles suffisent dans tous les cas où les deux points sont assez rapprochés pour qu'on puisse faire la visée avec précision. Lorsque les points sont très éloignés, on établit entre eux des stations intermédiaires où l'on fait des nivellements successifs. La différence de niveau cherchée est la somme des nivellements partiels. Cette opération s'appelle le *nivellement composé*.

185. **Niveau à bulle d'air.** — *Principe, description et définitions.* — Le *niveau à bulle d'air* est un instrument de précision dont la construction est fondée sur la condition d'équilibre d'un liquide

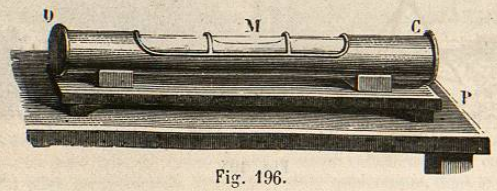


Fig. 196.

et d'un fluide superposés dans un même vase. Il consiste en un tube de verre AB faiblement cintré, qu'on remplit d'un liquide très fluide, comme l'alcool ou l'éther, en y conservant une petite bulle d'air (fig. 196). Ce tube, étant soudé à la lampe à ses deux extrémités, est renfermé dans un étui en laiton CD, muni

d'une large échancrure par où se voit une graduation tracée sur le verre, à sa partie supérieure. Cette gaine est ordinairement fixée sur une règle de même métal, dressée avec soin, qui sert de support à l'instrument.

Le niveau étant posé sur un plan quelconque, dès que les deux fluides intérieurs sont en équilibre, leur surface de séparation, qui est la surface du liquide, devient parfaitement horizontale, et la bulle d'air va se loger dans la partie la plus élevée du tube. La ligne idéale qui joindrait ses extrémités, étant une droite de la surface de séparation, est donc une ligne horizontale quelle que soit l'orientation du plan d'appui. Elle couperait l'échelle graduée du tube en deux traits, qui seraient variables avec l'orientation du plan d'appui. Mais si ce plan d'appui est horizontal, la bulle d'air vient se loger entre deux traits, qui définissent alors une ligne horizontale : ces deux traits seront toujours les mêmes toutes les fois que le niveau sera posé sur un plan horizontal; ils constituent donc des repères fixes *b* et *b'*, où (fig. 197) l'on marque ordinairement 0,0. La ligne *bb'* ou 00 s'appelle la *ligne des repères* du niveau.

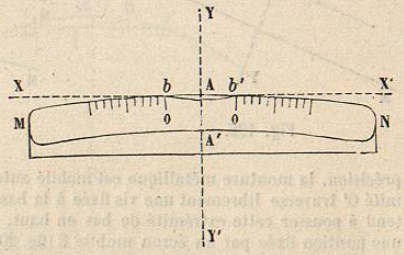


Fig. 197.

Réglage du niveau. — On dit qu'un niveau à bulle d'air *est régié, lorsque la ligne des repères est parallèle à la base du niveau.* Le réglage est une opération qu'on doit faire soi-même et répéter de temps en temps avant de se servir de l'instrument. Voici en quoi elle consiste :

1° On vérifie d'abord si le niveau est réglé ou non. Pour cela, on le pose sur un plan fixe à peu près horizontal, puis on cherche, par tâtonnements, une position pour laquelle la bulle vienne se placer entre ses repères. On retourne alors l'instrument bout pour bout et sur place. S'il est réglé, la bulle vient se replacer entre ses points de repère.

En effet, soit MN la base du niveau et *bb'* la ligne des repères. Quand on retourne le niveau bout pour bout, il effectue un mouvement de rotation autour de l'axe YY', perpendiculaire au plan de la base MN : le point M vient en N, et réciproquement (fig. 198). Si la ligne *bb'* est parallèle à la base, elle sera perpendiculaire au même axe et exécutera autour de lui un mouvement de rotation : le point *b* viendra donc en *b'*, et réciproquement. Quant à la bulle, elle n'a pas bougé pendant le mouvement, parce qu'elle est assujettie à occuper toujours les points les plus élevés du tube; elle se retrouvera donc dans la même position par rapport aux repères.

2° Supposons, au contraire, que la ligne des repères soit oblique par rapport

à MN, par exemple, dans la position bb' (fig. 199). L'opération du retournement la mettra dans une position $b_1 b'_1$, symétrique par rapport à l'axe de rotation YY'. La bulle elle-même n'a pas changé de place : elle fait donc un angle bYb'_1 avec la nouvelle position de la ligne des repères. Cet angle est double de celui que fait celle-ci avec la ligne MN. Donc, en inclinant le niveau par rapport à son plan de l'angle $N_1Yb_1 = \frac{1}{2} bYb'_1$, on produira le parallélisme de bb' et de MN, et le niveau sera réglé.

On peut toujours obtenir ce résultat par tâtonnements. Dans les niveaux de

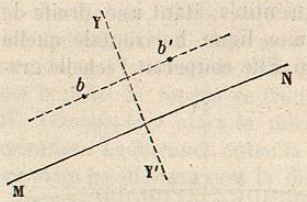


Fig. 198.

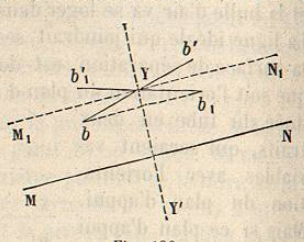


Fig. 199.

précision, la monture métallique est mobile autour d'un axe O. L'autre extrémité O' traverse librement une vis fixée à la base MN. Un ressort à boudin r tend à pousser cette extrémité de bas en haut, mais elle est maintenue dans une position fixée par un écrou mobile E (fig. 200).

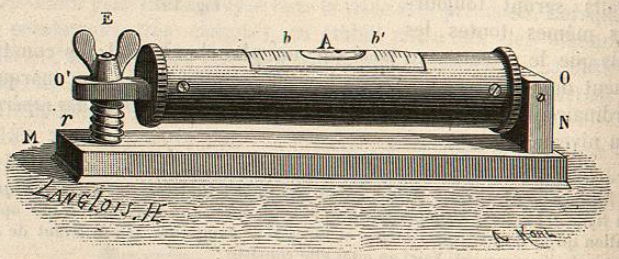


Fig. 200.

Conditions théoriques de perfection. — Un niveau à bulle d'air est théoriquement parfait lorsqu'il satisfait aux conditions suivantes :

1° Il doit être *parfaitement réglé;*

2° et 3° Il doit avoir une courbure *exactement circulaire* et *aussi faible que possible.*

Si la première condition est remplie, toutes les fois que la bulle viendra se loger entre les points de repère, on pourra en conclure sûrement que la base du niveau coïncide avec une horizontale du plan d'appui : cela résulte de la manière même dont le réglage a été fait.

Si la seconde condition est remplie, les déplacements de la bulle, sur l'échelle divisée, seront *exactement proportionnels* aux variations d'inclinaison de la base du niveau, et leur serviront de mesure.

En effet, soit bb' la position initiale de la bulle, lorsque le plan d'appui était horizontal ; elle coïncidait alors avec la ligne OO des points de repère (fig. 201, 1°). Si l'on aligne la base du niveau suivant la ligne de plus grande pente d'un plan incliné sur l'horizon d'un angle α (fig. 201, 2°), tandis que la bulle garde sa position horizontale bb', la ligne des repères, qui reste toujours parallèle à la

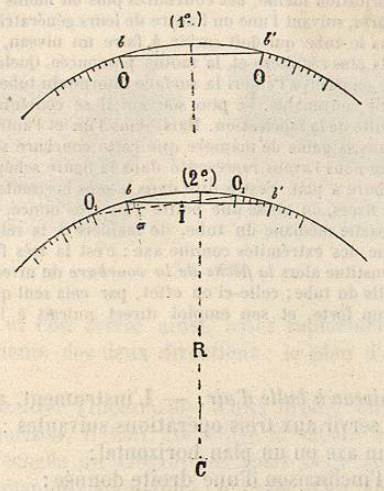


Fig. 201.

base du niveau, s'incline comme celle-ci d'un angle α, et prend une nouvelle position O_1O_1 : l'angle I des lignes bb' et O_1O_1 est évidemment égal à α. Comme cet angle est ex-inscrit dans la circonférence à laquelle est censée appartenir l'arête circulaire du niveau, il a pour mesure la demi-somme des arcs compris entre ses côtés, c'est-à-dire $\frac{\text{arc } O_1b + \text{arc } O_1b'}{2}$. Or les arcs O_1O_1 et bb' sont égaux, comme étant sous-tendus, dans une même circonférence, par des cordes égales, les arcs O_1b et O_1b' sont aussi égaux; on a donc

$$\frac{\text{arc } O_1b + \text{arc } O_1b'}{2} = \frac{2 \text{ arcs } O_1b}{2} = \text{arc } O_1b.$$

D'autre part, l'angle α serait mesuré dans la circonférence de rayon R (à laquelle appartient l'arête du niveau) par l'arc αR. On a donc

$$\text{arc } O_1b = \alpha R.$$

Or l'arc O_1b est précisément le déplacement apparent de la bulle : donc ce déplacement est *proportionnel à l'inclinaison du niveau*, et peut lui servir de mesure.

On voit, en outre, que le coefficient de proportionnalité R est le rayon de courbure du niveau. Par suite, le déplacement de la bulle sera d'autant plus grand, pour une même inclinaison du niveau, que le rayon de courbure du

niveau sera plus grand, et, par suite, *que la courbure sera plus petite*. La troisième condition, énoncée ci-dessus, est donc une *condition de sensibilité : un niveau sera d'autant plus sensible que sa courbure sera plus faible.*

Construction pratique du niveau. — Dans la construction du niveau, on doit s'attacher à réaliser autant que possible ces conditions théoriques de perfection. Les tubes en verre livrés par le verrier au constructeur ont tous, par suite de leur fabrication même, des courbures plus ou moins prononcées, plus ou moins régulières, suivant l'une ou l'autre de leurs génératrices. Le constructeur choisit, dans le tube qui doit servir à faire un niveau, la courbure qui paraît à la fois la plus régulière et la moins prononcée. Quelquefois il régularise la courbure en usant à l'émeri la surface interne du tube sur un mandrin en laiton de forme convenable. Le plus souvent il se contente de la courbure telle qu'elle résulte de la fabrication. Mais, dans l'un et l'autre cas, au lieu de placer le tube dans sa gaine de manière que cette courbure soit dans un plan vertical (ainsi que nous l'avons représenté dans la figure schématique 197), on place cette courbure à plat, c'est-à-dire dans le sens horizontal, puis, les deux extrémités étant fixées, on glisse une petite cale très mince, en papier ou en carton, sous la partie médiane du tube, de manière à la relever légèrement autour de la ligne des extrémités comme axe : c'est la très faible hauteur de cette cale qui constitue alors *la flèche de la courbure* du niveau, et non pas la courbure naturelle du tube; celle-ci en effet, par cela seul qu'elle est appréciable, serait trop forte, et son emploi direct nuirait à la sensibilité de l'instrument.

Usages du niveau à bulle d'air. — L'instrument, ainsi construit et réglé, peut servir aux trois opérations suivantes :

1° Rendre un axe ou un plan horizontal;

2° Mesurer l'inclinaison d'une droite donnée;

3° Rendre un axe vertical.

1° Quand le niveau doit s'appliquer sur un axe horizontal, il est porté par deux fourchettes, pouvant s'adapter à deux tourillons de même diamètre. Nous verrons ce dispositif dans le cathétomètre, et nous décrirons, à propos du réglage de cet instrument, l'emploi du niveau pour rendre un axe horizontal.

Quand le niveau doit servir à rendre un plan horizontal, sa monture est munie d'une base plane que l'on place sur une droite quelconque du plan. Celui-ci est ordinairement un trépied en forme de triangle, muni de trois vis calantes (fig. 202). On commence par disposer le niveau parallèlement à la direction des têtes de deux vis (fig. 202, I), et l'on agit sur l'une de celles-ci jusqu'à ce que la bulle vienne se fixer entre ses repères : à ce moment, la base du niveau et, par suite, la ligne du plan d'appui, qui coïncide avec la base, est une horizontale. Cela fait, on place le niveau dans une position sensiblement perpendiculaire à la première (fig. 202, II), et l'on rend cette direction horizontale, en agissant sur la troisième vis du plan. Si cette deuxième opération n'a pas altéré l'horizontalité de la ligne des deux autres vis, on peut en conclure que le plan est horizontal, puisqu'il contient deux

lignes horizontales. Mais, en général, la première horizontale a été plus ou moins inclinée par la deuxième opération. On recommence alors la première opération, puis la seconde, méthodiquement, jusqu'à ce que le résultat de l'une ne soit nullement altéré

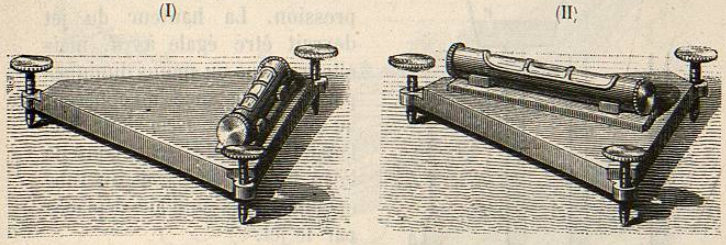


Fig. 202.

par l'autre, et l'on arrive ainsi, assez rapidement, à l'horizontalité permanente des deux directions : le plan d'appui est alors *horizontal*.

2° Pour mesurer l'inclinaison d'une droite, ou d'un plan, inclinés sur l'horizon, il faut connaître la valeur angulaire d'une division de l'échelle du niveau. On opère cette graduation préalable d'une manière empirique, à l'aide d'un appareil spécial, appelé *comparateur de niveau*. Cet appareil se compose d'un plan mobile autour d'un axe horizontal, et dont on peut modifier à volonté l'inclinaison de quantités connues, en lui communiquant son mouvement à l'aide d'une vis micrométrique verticale munie d'un tambour gradué comme celle du sphéromètre.

3° Enfin nous verrons, à propos du cathétomètre, comment le niveau peut servir à rendre un axe vertical.

186. **Cours d'eau. — Jets d'eau. — Puits artésiens.** — Les mers, les sources, les rivières, sont autant de vases communicants dans lesquels les eaux tendent sans cesse à prendre un même niveau. Il en est de même des jets d'eau artificiels et des bornes-fontaines.

La figure 203 suffit pour éclaircir la théorie de toutes ces applications naturelles ou industrielles. Si l'on verse de l'eau dans l'une des branches en U (I) du tube, le liquide s'élève dans l'autre branche, et, lorsque l'équilibre est établi, les niveaux *a* et *b* sont à une même hauteur. Supposons maintenant que le tube ait des branches inégales (II), la plus grande étant surmontée d'un réservoir plein d'eau, et la plus courte étant munie d'un robinet. Si celui-ci est d'abord fermé, et que le niveau dans la grande branche

dépasse de la hauteur *cd* le niveau dans la petite branche, le liquide exercera sur le robinet une pression équivalente au poids d'une colonne liquide ayant pour hauteur *cd* et pour base la section de la petite branche. Si donc on ouvre le robinet, l'eau jaillira verticalement, en vertu de cette pression. La hauteur du jet devrait être égale à *cd*, mais elle est plus ou moins diminuée par la résistance qu'opposent au mouvement ascensionnel de l'eau d'abord le frottement de l'eau contre les parois du tube et puis la masse d'air déplacée par le jet.

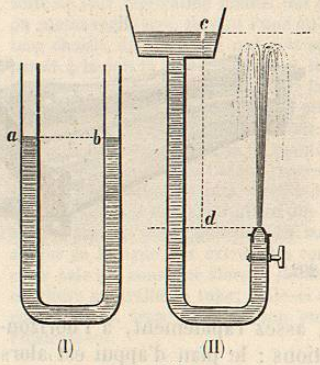


Fig. 203.

Le même principe s'applique à la théorie des *puits artésiens :* ce sont des sources artificielles, à eaux généralement jaillissantes[1].

Ces puits sont des trous très étroits, forés à la sonde, et d'une profondeur très variable, qui pénètrent jusqu'à une nappe d'eau souterraine emprisonnée entre des couches imperméables. Remarquons en effet que les terrains qui composent l'écorce du globe sont, les uns perméables aux eaux, comme les sables, les graviers; les autres imperméables, comme les argiles. Cela posé, soit un bassin géographique H, plus ou moins étendu, au-dessous duquel gisent deux couches imperméables, AB, CD (fig. 204), comprenant entre elles une couche perméable KK. Supposons cette dernière en communication avec des terrains plus élevés, à travers lesquels s'infiltrent les eaux des pluies. Ces eaux suivent la pente naturelle du terrain à travers la couche perméable et se rendent au-dessous du bassin géographique. Là elles s'accumulent, sans pouvoir communiquer avec la couche superficielle, dont elles sont séparées par la couche imperméable AB. Mais si, à partir du sol, on pratique un trou qui traverse cette couche, les eaux, tendant toujours à se mettre de niveau (fig. 203), s'élèvent dans ce trou à une hauteur d'autant plus grande, qu'elles communiquent avec un terrain plus élevé.

On appelle *niveau hydrostatique* d'un *puits foré*, la hauteur à

1. Ainsi nommés parce que c'est dans l'ancienne province d'Artois qu'ils ont d'abord été creusés. On y en rencontre dont l'origine paraît remonter à la fin du douzième siècle. A une époque beaucoup plus reculée, des puits de ce genre ont été creusés en Chine et en Égypte.

laquelle s'élève 'eau du puits dans le tube même qui a servi au forage. (On laisse ce tube dans le trou, comme un tuyau de conduite, pour empêcher la déperdition de l'eau à travers les couches per-

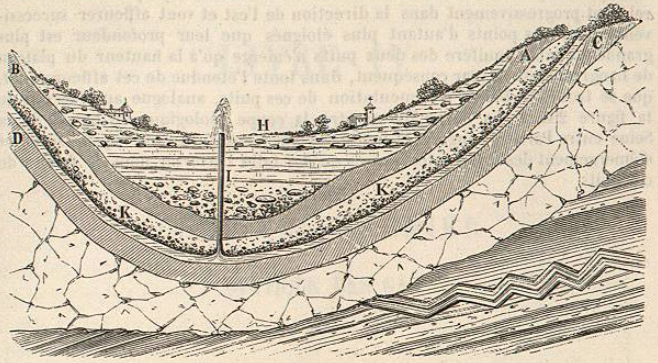


Fig. 204.

méables de la coupe.) Or on a constaté que le niveau hydrostatique d'un puits foré n'est pas invariable, mais qu'il monte ou qu'il descend suivant que les cours d'eau du pays où affleure la couche aquifère sont eux-mêmes en hausse ou en baisse. Ce fait est une preuve expérimentale de l'explication que nous avons donnée plus haut.

Puits forés de Grenelle et de Passy (*Paris*). — Les eaux qui alimentent les puits artésiens viennent souvent d'une distance de vingt à trente lieues. Quant à la profondeur, elle varie avec les localités. Les puits forés de Grenelle et de

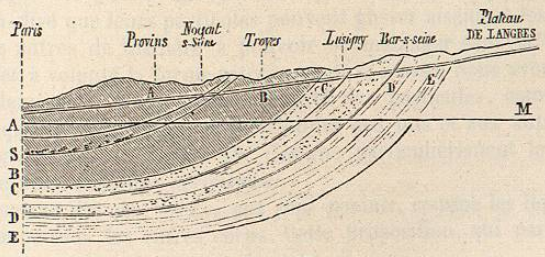


Fig. 205.

Passy sont les exemples les plus remarquables qu'on puisse citer de puits artésiens. Le premier a 548 mètres de profondeur; l'eau qui s'en échappe possède, en toute saison, une température de 27°, et son niveau hydrostatique

est d'environ 33 mètres. Celui de Passy a 570 mètres de profondeur; l'eau s'en échappe à la température de 28°.

Ces deux puits sont alimentés par une même couche de sable aquifère, qui est surmontée par une épaisse série de roches, notamment par un gisement de craie d'une épaisseur considérable. Toutes ces assises, superposées à Paris, se relèvent progressivement dans la direction de l'est et vont affleurer successivement en des points d'autant plus éloignés que leur profondeur est plus grande. Le sable aquifère des deux puits n'émerge qu'à la hauteur du plateau de Langres. C'est là, par conséquent, dans toute l'étendue de cet affleurement, que se trouve le bassin d'alimentation de ces puits, analogue au réservoir de la figure 203, 2°. La figure 205 montre la coupe géologique du bassin de la Seine entre Paris et Langres, et indique clairement l'ordre de superposition et d'émergement des différentes assises qu'il a fallu traverser dans le forage de ces puits.

LIVRE IV

PNEUMATIQUE

CHAPITRE PREMIER

STATIQUE DES GAZ

PRESSION ATMOSPHÉRIQUE ET BAROMÈTRES.

187. **Caractères physiques des gaz.** — On appelle *gaz* ou *corps gazeux* toutes les substances qui, dans les conditions atmosphériques ordinaires, se présentent sous le troisième état physique, ou *état gazeux*, défini précédemment (8). L'air est le type des gaz[1].

Parmi les propriétés qui caractérisent les gaz ou l'état gazeux au point de vue physique, les unes leur sont communes avec les liquides, les autres leur sont particulières. Les premières sont la *fluidité*, la *pesanteur*, l'*élasticité;* les autres sont la *compressibilité* et l'*expansibilité*.

Fluidité des gaz. — *Les gaz sont fluides* (comme les liquides), c'est-à-dire que leurs particules peuvent glisser aisément les unes sur les autres de manière à pouvoir se mélanger sans effort et changer à volonté la forme extérieure de la masse. Nous avons dit précédemment (8) que cette mobilité des particules, commune aux liquides et aux gaz, a fait donner aux uns et aux autres le nom générique de *fluides*. On désigne particulièrement les gaz sous le nom de *fluides aériformes*.

Pesanteur des gaz. — *Les gaz sont pesants*, comme les liquides et comme tous les autres corps. Cette proposition, qui paraît si

1. Du moins au point de vue physique, car on sait depuis Lavoisier que l'air n'est pas un gaz simple, mais un mélange de deux gaz simples, l'oxygène et l'azote. 100 parties d'air sont formées, *en volume*, de 20P,93 d'oxygène pour 79P,07 d'azote, ou bien, *en poids*, de 23 parties d'oxygène pour 77 parties d'azote.