

métal éprouve des modifications lentes, qui nécessitent, de temps à autre, une nouvelle comparaison de chaque instrument avec le baromètre à mercure, et un nouveau réglage.

131. Mesure des hauteurs par le baromètre. — La hauteur barométrique diminuant à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère, il serait intéressant d'obtenir une relation précise entre les variations de la colonne et les différences d'altitude correspondantes. Une pareille relation permettrait, par exemple, de déterminer la hauteur d'une montagne, au moyen de deux observations faites *simultanément*, l'une au sommet, l'autre au pied de la montagne.

Mais la diminution de la colonne barométrique est due, d'une part, à ce que la hauteur de la couche d'air située au-dessus du point considéré devient moindre; d'autre part, à ce que la densité de l'air va progressivement en décroissant jusqu'aux limites de l'atmosphère. Or, pour calculer avec exactitude les variations de densité de l'air, il ne suffit pas de tenir compte des variations de pression, il faudrait aussi faire intervenir, dans le calcul, un abaissement progressif de la température, que l'observation constate, mais dont la loi rigoureuse est encore inconnue. — On n'a donc pu établir une formule mathématique qu'en ayant recours à certaines hypothèses, et l'on a dû calculer ensuite, à l'aide de déterminations directes, effectuées dans les régions de l'atmosphère qui nous sont accessibles, les valeurs des coefficients que cette formule contient.

La formule la plus précise est celle qui est due à Laplace :

$$X = 18595^m (1 + 0,002857 \cos 2\lambda) \left[1 + \frac{2(T+t)}{1000} \right] \log \frac{H}{h};$$

X représente la hauteur cherchée, λ la latitude du lieu, T et H la température et la pression au pied de la montagne, t et h la température et la pression au sommet.

Quand la hauteur X ne dépasse pas 1000 ou 1200 mètres, on peut employer la formule plus simple donnée par Babinet,

$$X = 16000^m \left[1 + \frac{2(T+t)}{1000} \right] \frac{H-h}{H+h}.$$

(Voir à la fin du volume (livre VI, *Météorologie*) ce qui concerne les variations barométriques en un même lieu ou aux divers points du Globe).

CHAPITRE V

FORCE ÉLASTIQUE DES GAZ

I. — LOI DE MARIOTTE.

132. — La force élastique d'un gaz augmente à mesure que son volume diminue : c'est ce que montre l'expérience du *briquet à air* (27). Mais cet appareil ne permet d'évaluer ni les volumes successifs du gaz, ni les pressions qu'il supporte. On a dû recourir à d'autres expériences pour obtenir une relation précise entre ces quantités.

Remarquons d'abord que, lorsqu'une masse gazeuse est en équilibre, la force élastique de ce gaz est égale à la pression qu'il supporte : les deux expressions *force élastique du gaz* et *pression supportée par le gaz* peuvent donc être prises l'une pour l'autre.

133. Loi de Mariotte. — A une même température, les volumes d'une même masse gazeuse sont inversement proportionnels aux pressions qu'elle supporte (*).

Nous allons vérifier cette loi, au moins approximativement, pour l'air en particulier, au moyen de deux séries d'expériences.

1° Le *tube de Mariotte* est un tube de verre (*fig. 106*) formé de deux branches inégales; la plus grande B est ouverte, la plus petite A est fermée à sa partie supérieure. — On verse du mercure dans le tube, de manière à enfermer dans la branche A une certaine quantité d'air, et on commence par faire en sorte que les surfaces du mercure M et M' dans les deux branches soient dans un même plan horizontal, comme le représente la figure 107 (c'est ce à quoi on parvient facilement, en inclinant le tube de manière à laisser sortir un peu de l'air que contenait la petite branche). Lorsque ce résultat est obtenu, le volume de l'air AM peut se mesurer au moyen de divisions marquées sur la planche qui soutient le tube : supposons que ce volume corresponde, par exemple, à 20 divisions. Quant à la force élastique de l'air, elle est égale à la pression atmosphérique, qui s'exerce en M dans le même plan horizontal. — On ajoute alors du mercure dans la branche B, de

(*) Cette loi a été énoncée simultanément, vers 1670, en France par l'abbé Mariotte et en Angleterre par Boyle.

çon que le liquide, en s'élevant en A, comprime l'air et réduit son volume à moitié (fig. 108), c'est-à-dire à 10 divisions. Si la loi de Mariotte est exacte, la force élastique de cet air doit alors être égale à double de la pression atmosphérique; or, cette force élastique, qui

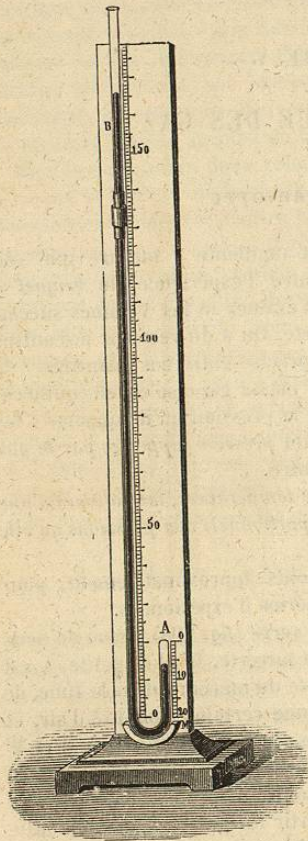


Fig. 105. — Tube de Mariotte.

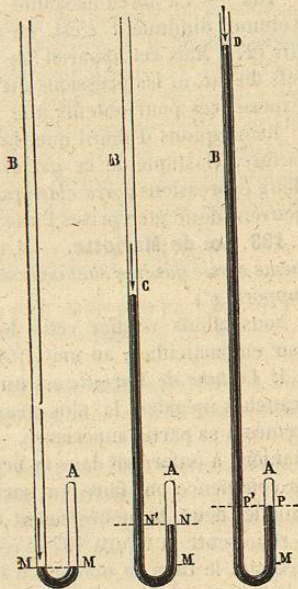


Fig. 107. Fig. 108. Fig. 109.

s'exerce en N, fait équilibre à la pression qui s'exerce en N' sur le même plan horizontal, c'est-à-dire à la pression de la colonne de mercure N'C, plus la pression atmosphérique exercée en C; donc la colonne N'C doit avoir une hauteur égale à la hauteur barométrique, c'est-à-dire à environ 76 centimètres; c'est ce que l'observation vérifie. — Si le tube B a une longueur suffisante, on pourra réduire le volume de

l'air au tiers AP du volume initial (fig. 109), et constater que sa force élastique devient alors triple de la pression atmosphérique, c'est-à-dire que la hauteur P'D du mercure au-dessus du niveau P est égale à deux fois la hauteur barométrique; et ainsi de suite.

2° Une autre disposition, due également à Mariotte, permet encore de vérifier la loi, en enfermant de l'air sous la pression atmosphérique et augmentant son volume. — On prend un tube de verre cylindrique B (fig. 110), semblable à un tube de baromètre, et, au lieu de l'emplir complètement de mercure, on y laisse un certain espace plein d'air; on bouche avec le doigt l'extrémité ouverte, et on la plonge dans une cuvette profonde à mercure M. — On enfonce d'abord le tube (fig. 111), de manière que les surfaces de mercure dans ce tube et dans la cuvette soient dans un même plan horizontal. On mesure le volume de l'air, en mesurant la longueur AM qu'il occupe dans le tube; quant à sa force élastique, elle est égale à la pression atmosphérique. — On soulève ensuite le tube, jusqu'à ce que le volume occupé par l'air devienne double de ce qu'il était; en même temps, on voit le mercure s'élever dans le tube (fig. 112). Or, si la loi de Mariotte est exacte, la force élastique de cet air doit alors être égale à la moitié de la pression atmosphérique; mais cette force élastique, ajoutée à la pression de la colonne de mercure soulevée MN, doit exercer, au niveau M du mercure extérieur, une pression égale à la pression atmosphérique; donc la colonne soulevée MN doit être égale à la moitié de

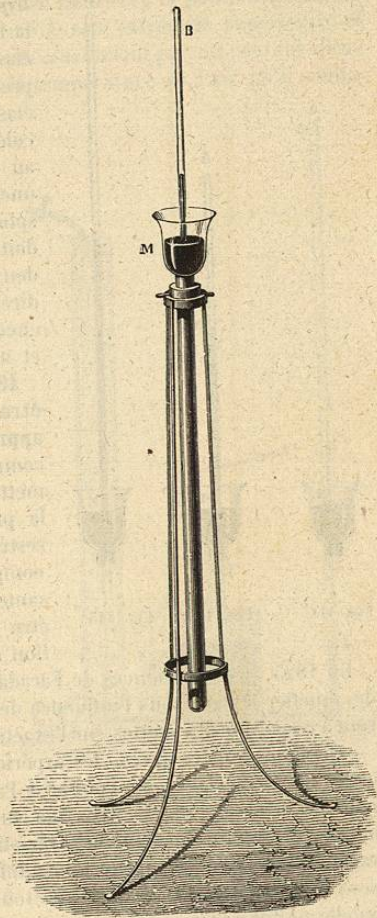


Fig. 110.

FACULTAD DE MEDICINA BIBLIOTECA

76 centimètres environ, ou à 58 centimètres. C'est ce qu'on vérifie en mesurant cette colonne. — On soulève encore le tube, jusqu'à ce

que le volume AP de l'air devienne *triple* du volume initial (fig. 115). Si la loi de Mariotte est exacte, sa force élastique doit être alors *le tiers* de la pression atmosphérique : cette force élastique, ajoutée à la pression de la colonne soulevée MP, doit produire, au niveau du mercure extérieur M, une pression égale à la pression atmosphérique : la colonne soulevée MP doit donc avoir une hauteur égale aux deux tiers de 76 centimètres, c'est-à-dire 51° environ. C'est ce qu'on vérifie encore en mesurant cette colonne; et ainsi de suite.

134. La loi de Mariotte ne doit être considérée que comme une loi approximative. — Les expériences comme celles qui précèdent ne permettent de faire varier le volume et la pression qu'entre des limites très restreintes. En outre, les mesures ne comportent pas une précision suffisante pour que les résultats puissent être considérés comme une vérification *rigoureuse* de la loi de Mariotte.

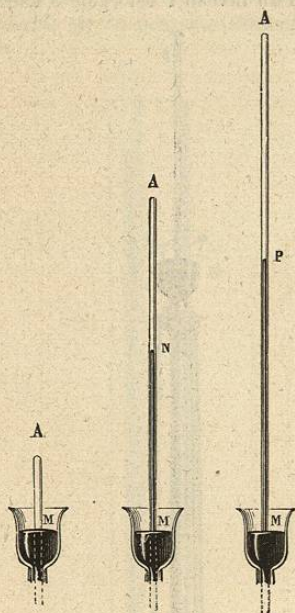


Fig. 111. Fig. 112. Fig. 115.

En 1825, des expériences de Faraday, effectuées spécialement en vue de vérifier les gaz sous l'influence de pressions considérables, amenèrent à concevoir des doutes sur l'exactitude absolue de la loi de Mariotte. — Quelques années après, les expériences d'Ørsted à Copenhague, et celles de Despretz et de Pouillet à Paris, montrèrent que des gaz de natures diverses, placés dans des tubes disposés à côté les uns des autres, et soumis aux mêmes variations de pression, éprouvent des variations de volume sensiblement différentes. — La loi de Mariotte ne pouvait donc pas être exacte pour tous les gaz; il était même possible qu'elle ne fût rigoureusement applicable à aucun d'eux.

Dès lors il devenait nécessaire de reprendre la question par des expériences permettant des mesures précises.

135. Principe de la méthode de Dulong et Arago. — Les expériences de Dulong et Arago portèrent exclusivement sur la loi de compressibilité de l'air. — Leur appareil, dont la figure 114 peut donner une idée, n'était autre qu'un tube de Mariotte, d'une très

grande hauteur, afin de pouvoir opérer sur de très grandes pressions.

La grande branche NS était formée par une suite de treize tubes de cristal, de 2 mètres chacun, qui étaient appliqués sur des poutres dressées dans la vieille tour carrée du lycée Henri IV; la petite branche AT était formée par un seul tube, fermé à son extrémité supérieure, et environné d'un manchon parcouru incessamment par un courant d'eau froide, pour maintenir constante la température de l'air qu'il contenait, malgré la chaleur dégagée par la compression. Ces deux branches verticales étaient mastiquées dans un conduit horizontal de fonte MN. Au lieu d'introduire le mercure par la partie supérieure de la grande branche, ce qui aurait produit des ébranlements capables de compromettre la solidité de l'appareil, on avait disposé, entre les deux branches, un réservoir R contenant une quantité de mercure assez considérable : lorsqu'on voulait faire varier la pression, on refoulait progressivement le mercure en comprimant, à sa surface *ab*, de l'eau que la petite pompe P puisait, par le tube *t*, dans un réservoir voisin.

Il est aisé de voir que le défaut principal de cette méthode était de présenter, dans la mesure des volumes successifs de l'air, une *sensibilité décroissante*. — En effet, soit TA le

volume occupé par l'air sous la pression atmosphérique; supposons, pour plus de simplicité, que le tube soit rigoureusement cylindrique, et qu'il ait une longueur de 2 mètres au-dessus du point A. La loi de Mariotte étant au moins une loi approchée, lorsque la pression acquiert des valeurs successives de 2, 5, 5, 10, 20 atmosphères, le gaz doit occuper des longueurs de tube représentées approximativement par $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{20}$ de AT. Or, dans l'évaluation de la première longueur BT, égale à environ 1 mètre, une erreur de lecture d'un millimètre représente seulement un millième du volume du gaz; la même erreur absolue d'un millimètre, commise sur la dernière longueur TK, c'est-

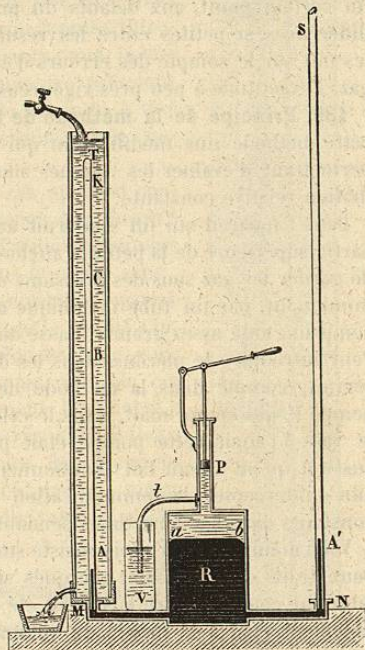


Fig. 114. — Appareil de Dulong et Arago.

à-dire sur un décimètre, représentera la centième partie du volume actuel du gaz; elle aura donc une valeur relative 10 fois plus grande que la précédente, et il est à craindre que, pour les pressions considérables, ces erreurs n'atteignent une valeur supérieure aux différences qu'on devrait constater.

Aussi, bien que l'appareil eût été construit avec un soin extrême, bien que l'habileté des expérimentateurs pût même suppléer, jusqu'à un certain point, aux défauts du procédé, on trouva, pour l'air, des différences si petites entre les résultats obtenus et la théorie, qu'on les mit sur le compte des erreurs d'expériences, et l'on admit, pour ce gaz, l'exactitude à peu près rigoureuse de la loi de Mariotte.

136. Principe de la méthode de Regnault. — Regnault apporta à cette méthode une modification qui en fit une méthode nouvelle, en permettant d'évaluer les volumes successifs du gaz avec une approximation relative constante.

Dans l'appareil qui fut construit au Collège de France (*fig. 115*), la partie supérieure de la petite branche fut munie d'un robinet *r*, capable de garder les gaz sous des pressions de plusieurs atmosphères, et communiquant, par un tube métallique *o'* avec un réservoir où l'on avait comprimé une assez grande masse de gaz sur lequel on devait opérer. Pour introduire le mercure dans les deux branches de l'appareil, on se servait, comme dans la méthode de Dulong et Arago, d'une petite pompe *P*, qui comprimait, dans le cylindre *C*, l'eau qu'elle puisait dans le vase *V*; mais cette pompe était placée sur le côté de l'appareil: aussitôt qu'on l'avait fait fonctionner, on fermait le gros robinet *R*, afin d'intercepter la communication et de maintenir les niveaux bien constants dans les deux tubes pendant l'observation.

Voici maintenant en quoi consiste surtout la supériorité de la méthode. Deux traits *a* et *b* étaient marqués sur la petite branche; le volume intérieur compris entre eux avait été exactement mesuré; il était sensiblement égal à la moitié du volume compris entre le trait *a* et le robinet *r*. Pour faire une expérience, on introduisait d'abord du gaz par le robinet *r* jusqu'à ce que le niveau du mercure descendit au point *a*, et on mesurait la pression de ce gaz, au moyen de la différence de hauteur du mercure dans les deux branches, et de la hauteur barométrique au moment de l'observation. On ouvrait alors le robinet inférieur *R*, et on faisait fonctionner la pompe à eau *P*, de manière à refouler le mercure dans la petite branche jusqu'en *b*, c'est-à-dire à réduire le volume à moitié; on fermait *R*, et on déterminait la nouvelle pression. S'il y avait une différence entre la pression ainsi mesurée et celle qu'aurait donnée la loi de Mariotte, on en connaissait le sens et la grandeur. — Pour opérer sous une pression plus grande, on ouvrait le robinet *r*, et on laissait entrer dans le tube une nouvelle quantité de gaz, de façon que le niveau du mercure revint en *a*: après avoir

déterminé la pression, on ouvrait *R* et l'on comprimait encore ce gaz jusqu'à ce que le niveau revint en *b*; on mesurait la nouvelle pression acquise par cette masse de gaz, et on la comparait encore avec celle qu'aurait fournie la loi de Mariotte. — On continua ainsi jusqu'aux pressions les plus considérables que permit d'atteindre la longueur de la grande branche. — On voit que, dans chacune des expériences, la masse gazeuse introduite dans le tube éprouvait toujours une même réduction de volume, et la mesure des pressions permettait de soumettre la loi de Mariotte à une série de vérifications dont la précision restait constante (*).

Les expériences effectuées avec cet appareil conduisirent Regnault à cette conclusion que, jusqu'à 50 atmosphères, l'air, l'azote et l'acide carbonique s'écartent de la loi de Mariotte dans le même sens: sous des pressions croissantes, leur volume éprouve des *diminutions plus grandes* que cette loi ne l'indique (**). L'écart est surtout considérable pour l'acide carbonique, c'est-à-dire pour celui de ces trois gaz qui est le plus facilement liquéfiable: ainsi, en combinant entre eux les résultats obtenus dans des expériences effectuées sous des pressions croissantes, on trouve que, pour réduire une même masse d'acide carbonique à $\frac{1}{10}$ du volume qu'elle occupait sous la pression atmosphérique, il suffit d'une pression

d'environ 15 atmosphères. — Au contraire, l'hydrogène s'écarte de la loi de Mariotte dans un sens opposé; pour des pressions

(*) Il eût été difficile de ramener toujours *exactement*, dans les expériences successives, les niveaux du mercure aux traits *a* ou *b*. On avait marqué sur le tube, au voisinage de chacun d'eux, un certain nombre de traits successifs, et l'on avait déterminé, par un jaugeage au mercure, les volumes intérieurs correspondants aux intervalles des traits consécutifs. On pouvait donc se contenter d'amener le mercure au voisinage des traits *a* ou *b*; on connaissait toujours, avec une exactitude sensiblement constante, le volume occupé par le gaz à chaque nouvelle détermination.

(**) On n'opéra pas sur l'oxygène pur, parce que ce gaz est absorbé par le mercure dès que la pression devient un peu considérable.

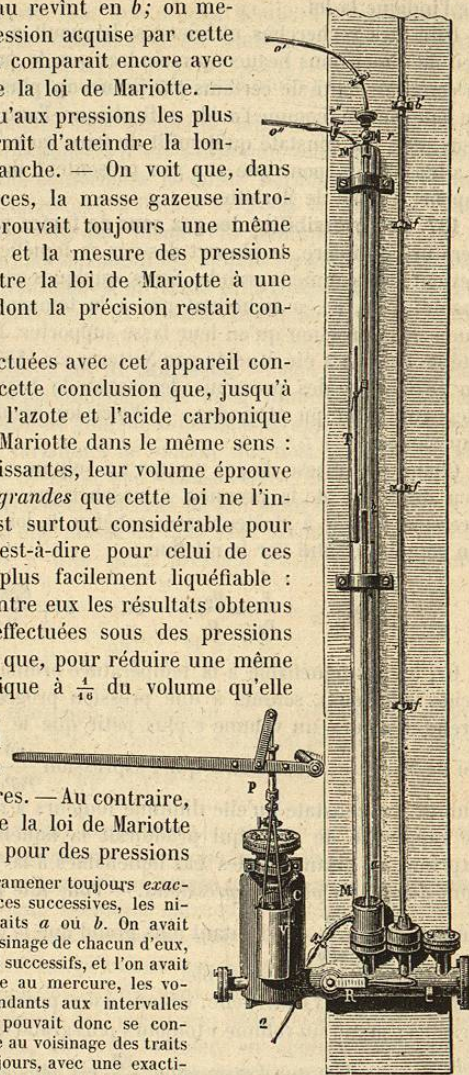


Fig. 115. — Appareil de Regnault

croissantes, son volume éprouve des diminutions *un peu moindres* que ne l'indique la loi.

Dans des recherches ultérieures, Regnault a pu employer un appareil de dimensions beaucoup moindres que le précédent, pour étudier la compressibilité de certains gaz beaucoup plus voisins de leur point de liquéfaction, comme l'acide sulfhydrique, l'ammoniaque, l'acide sulfurique, etc. Il a constaté qu'il suffit de faire varier la pression entre 1 et 2 atmosphères, pour que ces gaz présentent des écarts sensibles par rapport à la loi de Mariotte.

137. Compressibilité des gaz sous de fortes pressions. — A la température ordinaire, la plupart des gaz se liquéfient lorsque la pression devient suffisamment grande. Seuls, quelques gaz tels que l'hydrogène, l'azote, l'air, ne se liquéfient pas à la température ordinaire, quelle que soit la pression qu'on leur fasse supporter. La loi de compressibilité de ces gaz a été étudiée par Natterer en 1850, puis par M. Cailletet en 1870, sous des pressions dépassant de beaucoup les limites que Regnault avait pu atteindre. — Voici les résultats généraux de ces expériences.

Quand une masse de gaz occupe un volume v_0 sous une pression p_0 peu différente de la pression atmosphérique, si on le soumet à une pression p égale à plusieurs atmosphères, la loi de Mariotte lui assigne un volume v défini par la relation :

$$\frac{v}{v_0} = \frac{p_0}{p}, \quad \text{ou} \quad v = \frac{v_0 p_0}{p}.$$

Or, un gaz liquéfiable à la température ordinaire (acide carbonique, acide sulfureux), soumis à une pression progressivement croissante, prend toujours un volume v plus petit que le volume assigné par la loi de Mariotte; c'est-à-dire que l'expression $\frac{vp}{v_0 p_0}$ est plus petite que l'unité; on constate qu'elle diminue toujours à mesure que la pression se rapproche de celle qui produirait la liquéfaction. C'est ce qu'on exprime en disant que les gaz liquéfiables à la température ordinaire sont *de plus en plus compressibles*. — Pour une pression déterminée p , l'écart $1 - \frac{vp}{v_0 p_0}$ est d'autant plus grand que le gaz sur lequel on opère est plus facilement liquéfiable.

Au contraire, l'hydrogène, soumis à des pressions p de plus en plus grandes, prend un volume v toujours plus grand que le volume théorique $\frac{v_0 p_0}{p}$; c'est-à-dire que l'expression $\frac{vp}{v_0 p_0}$ est plus grande que l'unité; on constate même qu'elle croît à mesure que p augmente. On peut dire que l'hydrogène *résiste à la compression*, et y résiste de plus en plus.

Enfin, pour les autres gaz non liquéfiables à la température ordinaire, en particulier pour l'azote, tant que p croît depuis 1 atmosphère jusqu'à 75 atmosphères, le volume réel est plus petit que le volume théorique : l'expression $\frac{vp}{v_0 p_0}$, plus petite que l'unité, va en diminuant; à partir de 75 atmosphères elle augmente, repasse par l'unité pour une pression de 125 atmosphères (c'est-à-dire que, sous cette pression, le gaz prend un volume conforme à la loi de Mariotte); elle acquiert ensuite des valeurs supérieures à l'unité et assez rapidement croissantes. — On peut donc dire que, jusqu'à 75 atmosphères, l'azote se comporte comme un gaz liquéfiable, il est *de plus en plus compressible*; mais à partir de 75 atmosphères, il *résiste à la compression* : on constate même que, pour des pressions de 1500 atmosphères, il résiste plus que l'hydrogène.

138. Autre énoncé de la loi de Mariotte. — Si l'on fait abstraction des conditions exceptionnelles que nous venons d'indiquer, on peut dire que la loi reste, en général, *suffisamment approchée* pour permettre de calculer les variations de volume que doit éprouver un gaz sous des variations de pression peu considérables, et dans des conditions où il reste suffisamment éloigné de son point de liquéfaction.

Si V est le volume d'une masse de gaz sous la pression P , et V' le volume correspondant à une autre pression P' , la loi de Mariotte s'exprime par la formule

$$\frac{V}{V'} = \frac{P'}{P} \quad \text{ou} \quad VP = V'P'.$$

Or, si P'' est une troisième pression et V'' le volume correspondant, on aura encore $VP = V''P''$, et ainsi de suite; on peut donc écrire :

$$VP = V'P' = V''P'' = \dots$$

c'est-à-dire que, à une même température, le produit du volume d'une masse gazeuse par la pression correspondante est constant.

139. Évaluation du volume d'une masse gazeuse sous la pression normale. — Lorsque, pour comparer entre elles diverses quantités de gaz, on mesure les volumes qu'elles occupent, les résultats ne sont immédiatement comparables qu'autant que ces mesures ont été effectuées *sous une même pression*. — Or dans la plupart des cas, on ne peut pas disposer à volonté des pressions; mais, si les pressions des divers gaz sont connues, on peut calculer, en appliquant la loi de Mariotte, le volume que chacun d'eux occuperait sous la pression de 76 centimètres, qu'on désigne sous le nom de *pression normale*.

Soit, par exemple, un gaz contenu dans une éprouvette graduée en parties d'égales capacités, et placée sur le mercure; supposons

d'abord que le niveau du mercure dans l'éprouvette soit le même qu'à l'extérieur. La graduation donnera le volume V du gaz, sous la pression de l'atmosphère H , fournie par l'observation du baromètre au même instant. Dès lors le volume V' que le gaz occuperait sous la pression normale sera donné par la formule

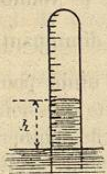


Fig. 116.

Supposons maintenant que le niveau dans l'éprouvette soit au-dessus du niveau extérieur (fig. 116); la force élastique du gaz est mesurée par la hauteur barométrique H , diminuée de la différence h des niveaux. Connaissant donc, au moyen de la graduation de l'éprouvette, le volume V du gaz sous la pression $H-h$, on en déduira le volume V' sous la pression normale, au moyen de la formule

$$V' = V \frac{H-h}{76}.$$

Ces exemples suffisent pour faire concevoir la manière d'opérer, dans les divers cas qui pourront se présenter.

II. — MESURE DE LA FORCE ÉLASTIQUE DES GAZ. — MANOMÈTRES.

140. Manomètres en général. — On donne le nom général de *manomètres* à des instruments destinés à mesurer les forces élastiques des gaz ou des vapeurs.

L'une des applications les plus importantes est la mesure des pressions dans les chaudières à vapeur. — Ces pressions étant généralement considérables, on a été conduit d'abord à les évaluer en *atmosphères*; cette unité de pression correspond à une force de 1^{re},033 par centimètre carré : c'est la valeur moyenne de la pression atmosphérique représentée par une colonne de mercure de 76 centimètres de hauteur. — L'usage a prévalu aujourd'hui de graduer les manomètres industriels en prenant, comme unité de pression, la *pression de 1 kilogramme par centimètre carré* (c'est la pression qu'exercerait une colonne de mercure dont la hauteur serait $\frac{76}{1,033}$, ou 73^{cm},5).

Lorsqu'un manomètre, adapté à une chaudière à vapeur, marque 10 kilogrammes, cela signifie que chaque centimètre carré de la paroi supporte une pression de 10 kilogrammes, de dedans en dehors; si l'on remarque que la paroi supporte extérieurement la pression de l'atmo-

sphère, équivalente à 1 kilogramme environ, on voit que la force résultante, celle qui tendrait à produire la rupture, est alors de 9 kilogrammes par centimètre carré. — La résistance de chaque chaudière ayant été évaluée par des essais préliminaires, l'observation du manomètre permet de faire en sorte que la pression reste toujours inférieure à celle qui a été atteinte dans ces essais.

141. Manomètre à air libre. — Le manomètre à air libre le plus simple consiste en un tube de verre MN (fig. 117), ouvert à ses deux extrémités, et plongeant dans une cuvette à mercure A placée dans une boîte métallique B; le tube est mastiqué solidement en C: la vapeur, arrivant dans la boîte par le robinet R, fait monter le mercure dans le tube. Cet appareil n'étant pas destiné à des évaluations précises, on suppose que le niveau du mercure reste invariable dans la cuvette. — Si le niveau dans le tube est sur le même plan horizontal que dans la cuvette, la pression dans la chaudière est égale à la pression atmosphérique, ou approximativement 1 kilogramme par centimètre carré; lorsque la pression dans la chaudière devient 2 kilogrammes, le mercure monte de 73^{cm},5 dans le tube; si la pression devient 3 kilogrammes, la hauteur du mercure devient égale à 73^{cm},5 \times 2; et ainsi de suite. On peut donc marquer 2, 3... kilogrammes, sur la planchette qui supporte le tube, à des distances du niveau du mercure dans la cuvette égales aux multiples successifs de 73^{cm},5. En subdivisant ensuite chacun de ces intervalles, on peut évaluer les fractions de kilogramme.

Fig. 118.
Manomètre à air comprimé.

142. Manomètre à air comprimé. — Le manomètre à air comprimé (fig. 118) diffère du précédent en ce que le tube de verre est plus court, et fermé à sa partie supérieure M. Dans ce tube est enfermée une quantité d'air telle, que, sous la pression atmosphérique égale à 1 kilogramme environ, les niveaux du mercure dans le tube et dans la cuvette soient sur un même plan horizontal. Lorsque, sous l'action d'une pression plus grande dans la boîte, le mercure monte dans le tube, l'air se comprime: pour évaluer la pression qui s'exerce en A, il faut ajouter, à la pression de la colonne de mercure, la force élastique de cet air, qui varie en raison

Fig. 117.
Manomètre à air libre.

inverse de son volume. On voit donc que la pression de 2 kilogrammes doit être indiquée à une distance du sommet M un peu plus grande que la moitié de MA; celle de 3 kilogrammes, à une distance un peu plus grande que le tiers de MA, et ainsi de suite. Les constructeurs déterminent généralement la position des points de division, en comparant les indications de l'instrument à celles d'un manomètre à air libre (*).

Le principal avantage de cet instrument est de n'avoir qu'une petite hauteur, et d'être, par suite, d'une installation plus commode que le manomètre à air libre. Mais les chiffres qui marquent les pressions un peu grandes, 8, 9, 10..., arrivent à être tellement voisins les uns des autres, qu'une petite erreur dans l'observation du niveau du mercure peut correspondre à une erreur considérable dans l'évaluation de la pression. — En outre, l'oxydation du mercure, qui se produit au contact de l'air comprimé, a pour effet de salir le tube et de rendre les indications peu précises.

143. Manomètres métalliques. — Aux manomètres à mercure on substitue, pour la plupart des machines à haute pression, des manomètres dont le jeu repose sur l'élasticité des métaux.

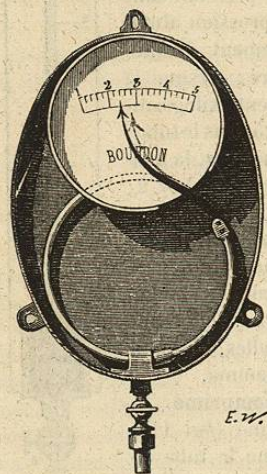


Fig. 119. — Manomètre métallique.



Fig. 120.

Le manomètre de Bourdon (fig. 119 et 120) se compose d'un tube métallique à paroi mince et à section elliptique. Ce tube est enroulé en spirale, comme le montre la figure 120 : l'une de ses extrémités communique avec la chaudière, au moyen d'un robinet; son autre extrémité est libre, et fermée par une pièce métallique qui porte une aiguille, comme le montre la figure 119. Lorsque la pression intérieure augmente, la spirale tend à s'ouvrir, et l'extrémité du tube entraîne l'aiguille sur un cadran divisé, où les pressions sont marquées en kilo-

(*) Les points de division peuvent être déterminés par le calcul, en supposant que le tube soit bien cylindrique à l'intérieur, de sorte qu'on puisse représenter les volumes de l'air par les longueurs qu'il occupe. — Soit l la longueur du tube, depuis le sommet M jusqu'au niveau du mercure dans la cuvette, niveau que nous supposons invariable; soit x la longueur du tube qui est occupée par l'air, pour une valeur H de la pression, exprimée en hauteur de mercure. Cet air occupait un volume représenté

grammes. La graduation est faite, pour chaque instrument, par comparaison avec un manomètre déjà construit.

144. Manomètres de Regnault. — On doit à Regnault diverses dispositions qui permettent de mesurer les pressions des gaz, dans les recherches précises, avec une grande exactitude.

Nous rappellerons d'abord l'emploi du grand tube ouvert (fig. 115) dans l'étude de la loi de Mariotte; il a permis de mesurer, avec une précision constante, des pressions qui ont atteint 50 atmosphères.

Pour mesurer des pressions comprises entre 1 et 5 atmosphères, Regnault a fréquemment employé le manomètre à air libre représenté par la figure 121. Le tube A est mis en communication avec l'enceinte qui contient le gaz ou la vapeur soumis à l'expérience; le tube F s'ouvre dans l'atmosphère. La différence h des niveaux du

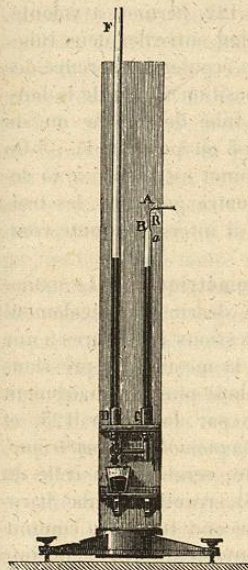


Fig. 121.

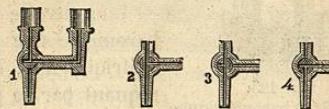


Fig. 122.

mercure dans les deux tubes, mesurée au cathétomètre, donne, avec l'observation de la hauteur barométrique H, la hauteur H + h qui mesure la pression du gaz dans l'enceinte.

par l sous la pression atmosphérique h ; il occupe un volume représenté par x sous la pression H - (l - x); on a donc, d'après la loi de Mariotte :

$$\frac{x}{l} = \frac{h}{H - l + x},$$

ce qui donne l'équation

$$x^2 + x(H - l) - lh = 0$$

$$x = \frac{H - l}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{H - l}{2}\right)^2 + lh}.$$

Ces deux valeurs de x sont réelles, mais celle qui correspond au signe - du radical est négative, et ne peut pas convenir; le signe + doit donc seul être conservé. En prenant successivement pour valeurs de H les multiples de 75^{mm},5, on saura à quelles distances de M on devra marquer les pressions successives, en kilogrammes.

On pourrait encore tenir compte de l'abaissement du mercure dans la cuvette, étant donné le rapport du diamètre de la cuvette à celui du tube : nous laisserons au lecteur le soin de résoudre cette question, qui n'offre aucune difficulté, et qui conduit, en prenant la même inconnue, à une équation semblable.