fut mise en mouvement, et bientôt, sous son impulsion, l'aérostat accélérait sa marche, obéissant fidèlement à la moindre indication de son gouvernail [1]. » Arrivés au-dessus du village de Villacoublay (fig. 243), à 4 kilomètres environ de Chalais, les aéronautes décidèrent de rebrousser chemin, et d'essayer de descendre au lieu même du départ. Ils exécutèrent donc, par une manœuvre convenable du gouvernail, un demi-tour sur la droite, puis plus loin un nouveau changement de direction sur la gauche, et bientôt ils vinrent planer à 300 mètres au-dessus du point de départ, où la descente s'effectua sans aucun accident. La figure 243 représente approximativement le tracé de ce voyage aérien [2].

5° *Conclusions.* — L'expérience de MM. Renard et Krebs est la première qui ait donné une démonstration expérimentale complète de la direction des aérostats. A ce titre elle mérite le retentissement qu'elle a obtenu dans le public; mais il ne serait pas juste d'en exagérer l'importance et la portée au détriment des expériences antérieures. Il ne faudrait pas croire, par exemple, « qu'il y avait un secret pour la direction des ballons, et que ce secret a tout à coup été découvert par les derniers chercheurs. » Les développements que nous avons donnés précédemment montrent « qu'il y avait simplement un problème travaillé par beaucoup de personnes (Giffard, Dupuy de Lôme, MM. Tissandier) qui a été résolu théoriquement et même pratiquement, dans l'air calme, et que la solution vient d'être étendue jusqu'au cas où la vitesse du vent est d'environ 5 mètres : elle s'arrête là [3]. » On voit qu'il reste beaucoup de progrès à faire dans le même sens, puisque, à Paris même, les vents dont la vitesse est inférieure à 7 mètres et qui permettraient l'emploi de l'aérostat dirigeable, règnent à peine 108 jours par an ; tout le reste de l'année, les vents sont plus forts et l'aérostat ne pourrait pas servir.

---

# CHAPITRE III

## COMPRESSIBILITÉ DES GAZ

### LOI DE MARIOTTE ET MANOMÈTRES.

223. **Loi de Mariotte.** — Mariotte, physicien français, a le premier [4] énoncé nettement la loi de la compressibilité des gaz.

ÉNONCÉ. — *Les volumes occupés par une masse donnée de gaz, à température constante, sont inversement proportionnels aux pressions qu'elle supporte.*

1. *Comptes rendus*, communication de MM. Renard et Krebs.
2. Cette carte a été dressée par MM. Tissandier, d'après la note scientifique de MM. Renard et Krebs.
3. J. Jamin, *les Ballons*.
4. *Essai sur la nature de l'air*, de l'abbé Mariotte (1676). — Quelques années auparavant (1662), en Angleterre, Boyle avait publié des expériences sur le même sujet (*Nova experimenta de vi aeris elastica*) qui conduisent à la même conclusion.



*Vérification expérimentale.* — 1° *Cas des pressions supérieures à une atmosphère. Tube de Mariotte.* — Cette loi fut vérifiée sur l'air au moyen d'un petit appareil qu'on appelle encore aujourd'hui le *tube de Mariotte*. Il est employé dans le cas où l'on soumet la

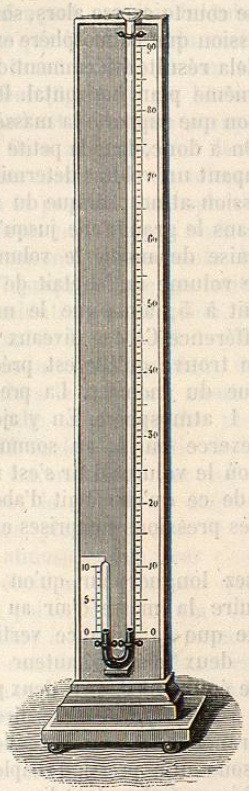

Fig. 244.

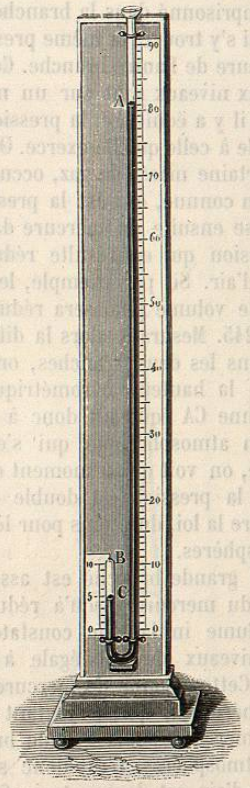


Fig. 245

masse gazeuse à des pressions qui croissent au delà d'une atmosphère.

Sur une planchette de bois, maintenue verticalement, est fixé un tube de verre recourbé, à branches très inégales (fig. 244 et 245). Le long de la petite branche, qui est fermée, est une échelle indiquant des capacités égales, tandis que l'échelle placée le long de

la grande branche donne les hauteurs en centimètres. Les zéros des deux échelles sont sur une même ligne horizontale.

On verse d'abord du mercure par le sommet de la grande branche de manière que le niveau du liquide s'élève au zéro dans les deux branches : ce qu'on obtient après quelques tâtonnements. L'air emprisonné dans la branche courte exerce alors, sur le mercure qui s'y trouve, la même pression que l'atmosphère exerce sur le mercure de l'autre branche. Cela résulte évidemment de ce que les deux niveaux sont sur un même plan horizontal. D'ailleurs, comme il y a équilibre, la pression que supporte la masse gazeuse est égale à celle qu'elle exerce. On a donc, dans la petite branche, une certaine masse de gaz, occupant un volume déterminé à une pression connue, qui est la pression atmosphérique du moment. On verse ensuite du mercure dans le grand tube jusqu'à ce que la pression qui en résulte réduise de moitié le volume de la masse d'air. Si, par exemple, le volume initial était de 10 divisions, le volume final sera réduit à 5, ainsi que le montre la figure 245. Mesurant alors la différence CA des niveaux du mercure dans les deux branches, on trouve qu'elle est précisément égale à la hauteur barométrique du moment. La pression de la colonne CA équivaut donc à 1 atmosphère. En y ajoutant la pression atmosphérique qui s'exerce en A, au sommet de la colonne, on voit qu'au moment où le volume d'air s'est réduit de moitié, la pression est double de ce qu'elle était d'abord. Cela démontre la loi, du moins pour les pressions comprises entre 1 et 2 atmosphères.

Si la grande branche est assez longue pour qu'on puisse y verser du mercure jusqu'à réduire la masse d'air au tiers de son volume initial, on constate que la distance verticale des deux niveaux devient égale à deux fois la hauteur barométrique. Cette colonne de mercure équivaut donc à deux pressions atmosphériques, qui, s'ajoutant à celle qui s'exerce directement sur le mercure de la grande branche, font une pression totale de 3 atmosphères. C'est donc sous une pression triple que le volume d'air est devenu trois fois moindre. Les dimensions de l'appareil ne permettent pas de pousser plus loin la vérification de la loi.

2° *Cas des pressions inférieures à une atmosphère. — Cuvette profonde.* — Au lieu de comprimer le gaz en le soumettant à des pressions croissantes, on peut le dilater en le soumettant à des pressions décroissantes : la loi se vérifie tout aussi bien. On se sert, dans ce cas, 1° d'un tube de Torricelli, aussi bien calibré que possible et divisé en parties d'égale longueur; 2° d'une



*cuvette profonde*, c'est-à-dire d'une cuvette en verre, telle que P, dont le fond est formé par un long et large tube en fer (fig. 246).

On remplit le tube de mercure environ jusqu'aux deux tiers et on laisse le reste plein d'air; puis on le retourne et on le plonge dans la cuvette profonde qui a été préalablement remplie de mercure. Enfonçant ensuite le tube jusqu'à ce que le niveau du mercure soit le même à l'intérieur et à l'extérieur (fig. 246), on lit sur le tube quel est le volume occupé par l'air. On a alors enfermé dans le tube une masse d'air de volume connu, à la pression atmosphérique du moment. Puis on soulève le tube, comme le représente la figure 247, jusqu'à ce que, par suite de la diminution de pression, le volume final de l'air AC soit double du volume initial AB (fig. 246). Or on voit alors le mercure monter dans le tube et y atteindre une hauteur CD égale à la moitié de la hauteur barométrique actuelle. L'air, dont le volume a doublé, n'est donc plus qu'à une demi-pression atmosphérique; car c'est la force élastique de cet air qui, jointe au poids de la colonne CD, fait équilibre à la pression atmosphérique extérieure. Le volume est donc bien encore en raison inverse de la pression.

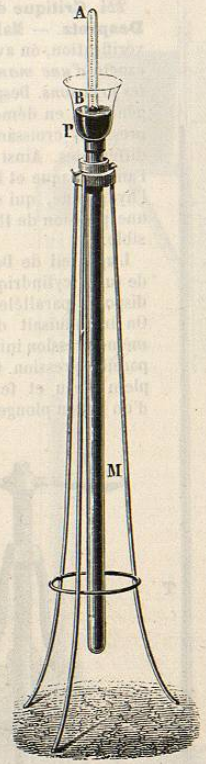

Fig. 246.

Fig. 247.

Si le tube est assez long, ou si le volume initial AB est assez petit, on peut pousser la vérification de la loi jusqu'à 1/3 d'atmosphère. Pour cela, il suffit de soulever le tube jusqu'à ce que le volume de l'air ait exactement triplé : à ce moment on constate que la colonne de mercure soulevée est égale aux 2/3 de la hauteur barométrique, et comme le poids du mercure soulevé, augmenté de la force élastique du gaz, fait équilibre à la pression atmosphérique, il en résulte que cette force élastique équivaut à un 1/3 d'atmosphère.

Remarque. — On peut mettre plus de précision dans cette expérience, en installant dans la même cuvette un tube de Torricelli, à poste fixe, et en mesurant chaque fois, au cathétomètre, la différence des niveaux dans les deux tubes.

224. **Critique de la loi de Mariotte. — Expériences de Despretz.** — Malgré l'insuffisance de ces expériences de vérification, on avait d'abord admis la loi de Mariotte comme exacte *d'une manière absolue pour tous les gaz et à toutes les pressions.* Despretz fit voir le premier qu'elle n'était pas générale, en démontrant que divers gaz, soumis aux mêmes pressions croissantes, subissent des réductions de volume différentes. Ainsi l'acide carbonique, l'hydrogène sulfuré, l'ammoniaque et le cyanogène se compriment plus que l'air ; l'hydrogène, qui se comporte d'abord comme l'air jusqu'à une pression de 15 atmosphères, est ensuite moins compressible.

L'appareil de Despretz se composait d'un certain nombre de tubes cylindriques de même calibre et de même hauteur, disposés parallèlement, sur une même cuvette à mercure. On introduisait dans chacun d'eux un gaz différent, à la même pression initiale, puis on enfermait le tout dans l'appareil à pression. C'était une espèce de piézomètre, en verre, plein d'eau et fermé par une garniture métallique munie d'un piston plongeur à vis, analogue à celui de la figure 248. On n'avait qu'à tourner la vis pour enfoncer plus ou moins le piston et faire varier la pression dans l'eau de l'éprouvette et par suite dans la cuvette à mercure.

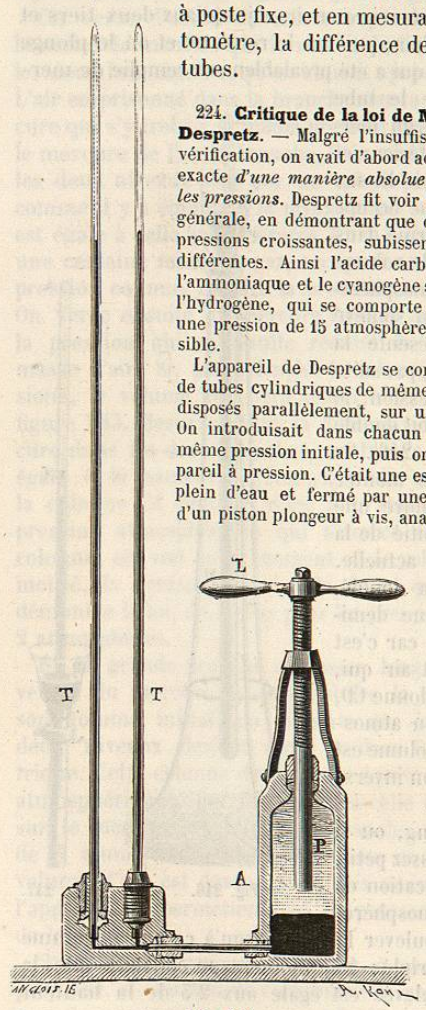

Fig. 248.

225. **Expériences de Pouillet.** — Les conclusions de Despretz relatives à l'*inégale compressibilité des divers gaz* furent confirmées par des expériences de Pouillet. Ce dernier employa un appareil qui lui permettait de placer dans les mêmes conditions initiales deux gaz, tels que l'air et l'acide carbonique, et de les comprimer simultanément sous une même pression. C'était un cylindre en fonte, très résistant, qu'on avait rempli d'une couche de mercure surmontée d'une couche d'huile (fig. 248). La pression était produite par l'introduction dans le liquide d'un piston plongeur P, qu'on pouvait manœuvrer aisément à l'aide de la manivelle L. La pression se transmettait, par l'intermédiaire du mercure, simultanément à deux gaz diffé-



rents contenus dans deux tubes en cristal T et T', gradués avec soin. Ces tubes étaient solidement mastiqués dans une pièce en fonte, qui forme avec le cylindre un système de vases communiquants.

226. **Expériences de Dulong et Arago.** — La loi de Mariotte avait donc

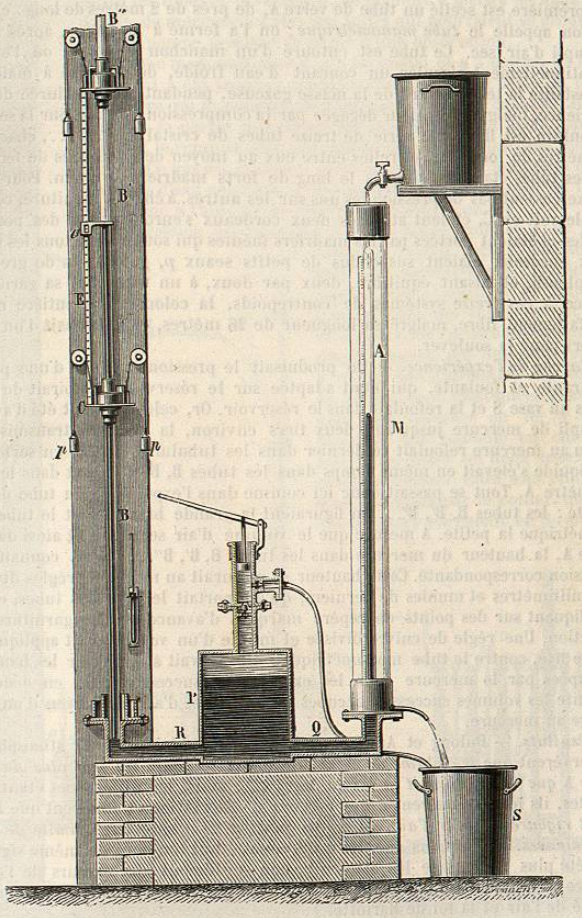

Fig. 249.

été trouvée en défaut : elle n'était pas générale. Restait à savoir si elle était rigoureusement applicable même à un seul gaz, par exemple à l'air atmosphérique. L'occasion de résoudre cette question se présenta naturellement à Dulong et à Arago. Ces deux savants, ayant été chargés de déterminer les ten-

sions maxima de la vapeur d'eau à des températures élevées, durent commencer par graduer pour cet usage un instrument de mesure, appelé *manomètre à air comprimé* (236), qui est précisément fondé sur la loi de Mariotte.

*Appareil.* — Ils disposèrent donc leur appareil comme le montre la figure 249. Un réservoir de fonte P porte latéralement deux tubulures Q, R. Dans la première est scellé un tube de verre A, de près de 2 mètres de long : c'est ce qu'on appelle le *tube manométrique;* on l'a fermé à la lampe, après l'avoir rempli d'air sec. Ce tube est entouré d'un manchon de verre où l'on fait continuellement circuler un courant d'eau froide, de manière à maintenir constante la température de la masse gazeuse, pendant toute la durée de l'expérience, malgré la chaleur dégagée par la compression de l'air. Sur la seconde tubulure est fixée une série de treize tubes de cristal B, B', B''..., chacun de 2 mètres de longueur, et reliés entre eux au moyen de garnitures de fer.

Ces tubes étaient appliqués le long de forts madriers de sapin. Pour qu'ils n'exerçassent pas de pression les uns sur les autres, à chaque garniture, comme on le voit en C, étaient attachés deux cordeaux s'enroulant sur des poulies : celles-ci étaient portées par les madriers mêmes qui soutenaient tous les tubes. Aux cordeaux étaient suspendus de petits seaux *p*, *p*, chargés de grenaille de plomb, et faisant équilibre, deux par deux, à un tube et à sa garniture. Grâce à ces treize systèmes de contrepoids, la colonne tout entière restait parfaitement libre, malgré sa longueur de 26 mètres, et il suffisait d'un léger effort pour la soulever.

*Marche de l'expérience.* — On produisait le pression à l'aide d'une pompe aspirante et foulante, qui était adaptée sur le réservoir P, aspirait de l'eau dans un vase S et la refoulait dans le réservoir. Or, celui-ci ayant été d'avance rempli de mercure jusqu'aux deux tiers environ, la pression transmise par l'eau au mercure refoulait ce dernier dans les tubulures Q et R, en sorte que le liquide s'élevait en même temps dans les tubes B, B' B''..., et dans le manomètre A. Tout se passait donc ici comme dans l'expérience du tube de Mariotte : les tubes B, B', B''... en figuraient la grande branche, et le tube manométrique la petite. A mesure que le volume d'air se réduisait ainsi dans le tube A, la hauteur du mercure dans les tubes B, B', B''... faisait connaître la pression correspondante. Cette hauteur se mesurait au moyen de règles divisées en millimètres et munies de verniers, qu'on portait le long des tubes, en les appliquant sur des points de repère marqués d'avance sur les garnitures de jonction. Une règle de cuivre divisée et munie d'un vernier était appliquée, à poste fixe, contre le tube manométrique : elle servait à apprécier les hauteurs occupées par le mercure dans les expériences successives. On en déduisait ensuite les volumes successifs occupés par la masse d'air, au moyen d'un jaugeage au mercure.

*Résultats.* — Dulong et Arago, ayant expérimenté jusqu'à 27 atmosphères, observèrent que *le volume de l'air diminuait toujours un peu plus dans le tube* A *que ne l'indiquait la loi de Mariotte;* mais, les différences étant très petites, ils les attribuèrent à des erreurs d'observation et admirent que *la loi était rigoureuse pour l'air, du moins jusqu'à* 27 *atmosphères, limite de leurs expériences.* Remarquons que, les différences étant toujours de même signe, il eût été plus logique de les attribuer, non seulement aux erreurs de l'expérience, mais aussi à une divergence probable entre la loi réelle de compressibilité de l'air et la loi de Mariotte.

227. **Expériences de Regnault.** — Regnault publia, en 1847, des expériences sur la compressibilité des gaz qui firent époque dans la science. Son appareil, qui avait beaucoup de rapport avec celui de Dulong et Arago, présentait de nombreux perfectionnements de détail; sa méthode permettait de se mettre à l'abri ou de tenir compte de toutes les causes d'erreur inhérentes aux méthodes des précédents expérimentateurs.



1° *Appareil.* — La figure 250 représente l'ensemble de l'appareil de Regnault et quelques-uns de ses détails les plus importants. On en voit tout de suite la grande analogie avec l'appareil précédent.

Les tubes A et B sont juxtaposés parallèlement et en dehors de la pompe à mercure H. Un robinet en fonte R est interposé entre les tubes et le réservoir, de manière à mettre les deux colonnes de mercure à l'abri des fuites qui pourraient se produire dans la pompe pendant la durée d'une observation.

Le tube manométrique B est en cristal et a 3 mètres de longueur; il a été jaugé et divisé en millimètres : il porte un trait de repère qui le partage en deux parties d'égale capacité. Il est fermé à sa partie supérieure par un robinet *p* en acier, par où on peut le remplir d'un gaz quelconque, à une pression déterminée. Ce gaz est conservé dans un réservoir V, maintenu dans un bain d'eau courante à une température constante; on l'y a comprimé à l'aide de la machine de compression P.

La pression est mesurée à l'aide d'une colonne A de huit tubes en cristal, égaux chacun au tube B, parfaitement équilibrée comme dans l'appareil de Dulong. L'assemblage des tubes se fait par un système de raccord extrêmement simple, appelé par Regnault *collier à gorge.* Les extrémités des tubes, en regard, sont mastiquées chacune dans une tubulure en fer à base conique; une rondelle en cuir est interposée entre les deux bases des cônes en contact. Elles sont embrassées et serrées par le collier, qui est creusé intérieurement en forme de

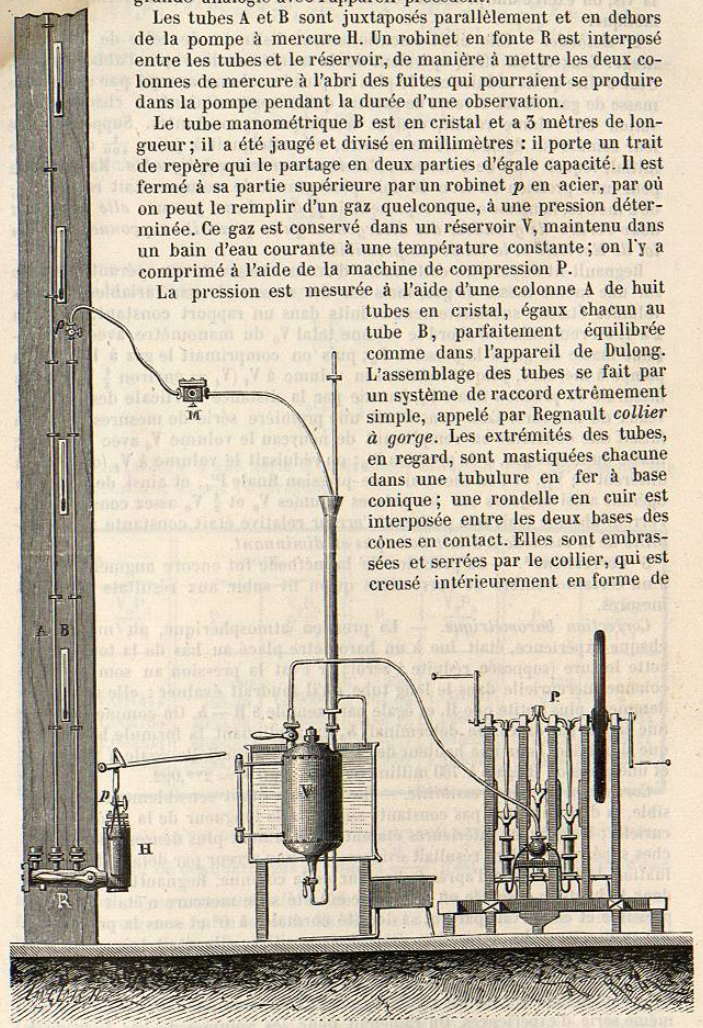


Fig. 250.

gorge biconique, d'une ouverture un peu plus aiguë que celle des bases des

tubes. Ce collier est formé de deux parties articulées autour d'une charnière, et pouvant être rapprochées ou écartées à l'aide d'une vis. En serrant la vis, on exerce une pression considérable et l'on obtient une fermeture hermétique.

2° *Méthode.* — Elle était essentiellement distincte de celle de Dulong et Arago. Ceux-ci, en effet, opéraient de la même manière que l'abbé Mariotte, c'est-à-dire qu'ils réduisaient de plus en plus le volume occupé par une même masse de gaz. Or les erreurs de mesure qu'ils commettaient, à chaque observation du volume réduit, étaient sensiblement constantes. Supposons que leur somme fût égale à 1/2 centimètre, elle atteignait à peine $\frac{1}{400}$ du volume initial, lequel était de 2 mètres ; *c'était une erreur négligeable.* Mais lorsque pour une pression environ 20 fois plus grande le volume était réduit à $\frac{1}{20}$ de 2 mètres, la même erreur représentait $\frac{1}{20}$ du volume gazeux; *elle atteignait donc l'ordre de grandeur des divergences qu'on pouvait soupçonner entre la loi de Mariotte et la loi de compressibilité.*

Regnault fit disparaître cette cause d'erreur croissante en opérant, non plus sur une même masse de gaz, mais sur des masses de gaz variables, dont les volumes étaient successivement réduits dans un rapport constant, d'environ 2 à 1. On remplissait d'abord le volume total $V_0$ du manomètre avec une certaine masse de gaz à la pression $P_0$; puis on comprimait le gaz à l'aide de la pompe à mercure, jusqu'à réduire son volume à $V_1$ ($V_1$ = environ $\frac{1}{2}$ $V_0$), et l'on mesurait la pression finale $P_1$, fournie par la distance verticale des deux niveaux du mercure. Cela constituait une première série de mesures. — On en faisait une deuxième en remplissant de nouveau le volume $V_0$ avec une autre masse du même gaz, à la pression $P'_0$; on réduisait le volume à $V_1$ (ou $V'_1$, peu différent de $V_1$), et l'on mesurait une pression finale $P'_1$, et ainsi de suite. En opérant ainsi toujours sur les mêmes volumes $V_0$ et $\frac{1}{2}$ $V_0$ assez considérables, l'erreur absolue était très petite, et l'erreur relative était constante : *la sensibilité de la méthode n'allait donc pas en diminuant.*

3° *Corrections*[1]. — La précision de la méthode fut encore augmentée grâce à un certain nombre de corrections qu'on fit subir aux résultats bruts des mesures.

*Correction barométrique.* — La pression atmosphérique, au moment de chaque expérience, était lue à un baromètre placé au bas de la tour. Soit H cette lecture (supposée réduite à zéro); or c'est la pression au sommet de la colonne mercurielle dans le long tube qu'il faudrait évaluer : elle serait évidemment plus petite que H, et égale par exemple à $H - h$. On commettait donc une erreur par excès. On déterminait $h_0$ en appliquant la formule barométrique simplifiée. Pour une hauteur de la colonne mercurielle égale à 22 mètres, et une pression H égale à 760 millimètres, on avait $h = 2^{mm},092$.

*Correction de compressibilité.* — Le mercure étant sensiblement compressible, la densité n'était pas constante sur toute la longueur de la colonne mercurielle; les couches inférieures étaient sensiblement plus denses que les couches supérieures. Il en résultait évidemment une erreur par défaut dans l'évaluation de la pression d'après la hauteur de la colonne. Regnault transformait donc la hauteur observée en ce qu'elle eût été si le mercure n'était pas compressible et conservait partout sa densité normale, à 0° et sous la pression de 760 millimètres. La correction était donc positive; elle était très petite, car elle n'atteignait pas $1^{mm},2$ pour une hauteur totale de 22 mètres.

*Correction de température.* — La température de l'eau froide qui circulait dans le manchon n'était pas rigoureusement constante pendant la durée d'une même série d'expériences. On ramenait donc les volumes du gaz à ce qu'ils eussent été si la température eût été constante.

1. Voir le détail de ces corrections dans la *Physique* de Violle, t. Ier.



4° *Résultats.* — Si la loi de Mariotte *s'appliquait à un gaz déterminé*, on devrait avoir pour toute la série des mesures qui le concernent :

$$V_0P_0 = V_1P_1, \quad V'_0P'_0 = V'_1P'_1, \text{ etc.}, \quad \text{ou} \quad \frac{V_0P_0}{V_1P_1} = 1 = \frac{V'_0P'_0}{V'_1P'_1} = \ldots \text{etc.}$$

Si, au contraire, le gaz était *plus compressible* que ne l'indique la loi de Mariotte, on devrait avoir

$$\frac{V_0}{V_1} > \frac{P_1}{P_0} \quad \text{ou} \quad \frac{V_0P_0}{V_1P_1} > 1$$

inégalités qu'on peut exprimer aussi par l'égalité

$$\frac{V_0P_0}{V_1P_1} = 1 + \varepsilon,$$

où $\varepsilon$ désigne une quantité plus petite que l'unité

Enfin, si le gaz était *moins compressible*, on devrait avoir

$$\frac{V_0P_0}{V_1P_1} < 1,$$

où bien

$$\frac{V_0P_0}{V_1P_1} = 1 - \varepsilon.$$

Or voici le tableau d'une série d'expériences faites sur l'air, sur l'azote, sur l'acide carbonique et sur l'hydrogène;

| AIR. | | AZOTE. | | ACIDE CARBONIQUE. | | HYDROGÈNE. | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $P_0$ | $\frac{V_0P_0}{V_1P_1}$ | $P_0$ | $\frac{V_0P_0}{V_1P_1}$ | $P_0$ | $\frac{V_0P_0}{V_1P_1}$ | $P_0$ | $\frac{V_0P_0}{V_1P_1}$ |
| mm | | mm | | mm | | mm | |
| 738,72 | 1,001414 | 753,46 | 1,000988 | 764,03 | 1,007597 | » | » |
| 2112,55 | 1,002765 | 4953,92 | 1,002952 | 3186,13 | 1,028698 | 2211,18 | 0,998584 |
| 4140,82 | 1,003253 | 8628,54 | 1,004768 | 4879,77 | 1,045625 | 5845,18 | 0,996121 |
| 9336,41 | 1,006366 | 10981,42 | 1,006456 | 9619,97 | 1,155865 | 9176,50 | 0,992953 |

La comparaison de ces nombres a conduit Regnault aux conclusions suivantes

1° Pour aucun de ces quatre gaz le rapport $\frac{V_0P_0}{V_1P_1}$ n'est égal à 1 : *aucun d'eux n'obéit donc rigoureusement à la loi de Mariotte.* La différence $\varepsilon$ restant très faible, la divergence entre la loi de Mariotte et la véritable loi de compressibilité n'est pas très grande. Elle est négligeable pour de faibles pressions; elle s'accuse davantage à mesure que la pression du gaz augmente.

2° $\varepsilon$ est positif pour l'air, l'azote et l'acide carbonique : donc *ces trois gaz sont plus compressibles que ne l'indique la loi de Mariotte.* Pour l'hydrogène $\varepsilon$ est négatif : *donc ce gaz est moins compressible;* mais la divergence diminue quand la pression augmente, contrairement à ce qui a lieu pour les autres gaz

3° Tous les autres gaz étudiés par Regnault se comportent comme l'air. Ils sont plus compressibles que ne l'indique la loi de Mariotte. La divergence est

beaucoup plus grande pour les gaz liquéfiables, tels que l'acide carbonique, l'acide sulfureux, le gaz ammoniac, le cyanogène, que pour les gaz anciennement appelés *permanents*.

4° L'équation simple $\frac{V_0 P_0}{V_1 P_1} = 1$, qui exprime la loi de Mariotte, ne s'applique donc à aucun gaz. Regnault a déduit de ces expériences une formule empirique représentant la loi de compressibilité de quelques gaz. Elle est

$$\frac{V_0 P_0}{VP} = 1 \pm A\left(\frac{V_0}{V} - 1\right) \pm B\left(\frac{V_0}{V} - 1\right)^2 :$$

A et B sont des constantes dont les valeurs sont *différentes pour chaque gaz* et sont pour tous *extrêmement petites*.

228. **Expériences postérieures à celles de Regnault.** — Regnault n'avait étudié la compressibilité des gaz qu'aux températures ordinaires, et sous des pressions moyennes, variant de 1 à 27 atmosphères. Après lui, plusieurs expérimentateurs ont poussé cette étude, pour les divers gaz, permanents ou liquéfiables, jusqu'à des températures élevées (de 0° à 320° [1]) et entre des limites de pressions très étendues (depuis 0mm,259 [2]) jusqu'à 3000 atmosphères [3]. Voici les résultats les plus nets de ces recherches :

1° *Compressibilité de l'hydrogène.* — L'hydrogène soumis à des pressions moyennes (expériences de Regnault) possède une compressibilité *presque égale*, quoique déjà un peu inférieure, à celle qui résulterait de la loi de Mariotte; puis, à mesure que la pression croît, cette compressibilité décroît d'une manière continue : ainsi, vers 3000 atmosphères, le volume d'une masse donnée de ce gaz est trois fois plus grand que ne l'exigerait la loi de Mariotte (expériences de Natterer, de M. Cailletet, de M. Amagat).

2° *Découverte du point critique des gaz.* — En étudiant la compressibilité de l'acide carbonique à des températures croissantes, Andrews a découvert un fait capital : *Au-dessus d'une certaine température, l'acide carbonique ne peut pas être liquéfié, quelle que soit la pression.* Cette température limite a été appelée par Andrews le *point critique* du gaz : elle est de 30°,92 pour l'acide carbonique.

Ce fait n'est pas particulier à l'acide carbonique : tous les gaz ont un *point critique*, variable avec la nature du gaz, et d'autant plus bas, dans l'échelle des températures, que le gaz est moins facilement liquéfiable. Les gaz dits *permanents* ont des points critiques extrêmement bas; ils sont devenus liquéfiables, par compression, à partir du moment où l'on a pu opérer à des températures aussi basses que leurs points critiques.

3° *Existence d'un maximum de compressibilité pour tous les gaz.* — Tout gaz *permanent*, c'est-à-dire pris à une température supérieure à son point critique et pour laquelle il n'est pas liquéfiable, commence par être plus compressible que ne l'indiquerait la loi de Mariotte, puis il le devient de plus en plus, à mesure que la pression augmente, jusqu'à un certain maximum; après quoi sa compressibilité décroît quand la pression continue à augmenter, devient conforme à la loi de Mariotte et finit par diminuer d'une manière continue, comme celle de l'hydrogène (expériences de M. Cailletet).

4° *Influence de la température d'un gaz sur sa compressibilité.* — Quand le gaz est pris à une température notablement supérieure à son point critique, il se comporte toujours comme l'hydrogène. Quand la température est plus ou moins inférieure au point critique, la compressibilité du gaz est tout d'abord

1. M. Amagat : Expériences sur l'acide sulfureux.
2. Amagat : Expériences sur l'air.
3. Natterer, Cailletet : Expériences sur les gaz permanents.



supérieure à celle qui résulterait de la loi de Mariotte, et elle augmente sans cesse avec la pression jusqu'à une limite qu'il atteint au moment de sa liquéfaction : cette compressibilité limite est précisément égale à celle du liquide formé (expériences de M. Amagat; formule de Clausius).

5° *Compressibilité des gaz aux basses pressions.* — Quelques expériences faites à des pressions très inférieures à la pression atmosphérique ont conduit les expérimentateurs (MM. Siljeström, Amagat, Mendéléef) à des résultats tout à fait discordants. La marche du phénomène reste donc encore inconnue dans ces conditions [1].

229. **Expressions analytiques de la loi de Mariotte.** — Il résulte de l'ensemble de ces expériences que la loi de Mariotte, malgré sa simplicité, ne représente exactement la loi de compressibilité d'aucun gaz. On doit la considérer comme une sorte de *loi limite*, dont les différents gaz s'approchent plus ou moins, suivant les pressions initiales qu'ils possèdent et suivant leur température. Du reste, pour tous les gaz éloignés de leur point de liquéfaction, et en particulier pour l'air atmosphérique et les gaz jadis appelés *permanents*, les écarts sont si faibles pour des variations de pression peu considérables et à la température ordinaire, qu'on peut les négliger absolument et appliquer la loi de Mariotte dans tous les calculs relatifs à la compressibilité.

*Première formule.* — L'expression du précédent énoncé de la loi est évidemment

$$[1] \qquad \frac{V_1}{V_0} = \frac{P_0}{P_1}.$$

Cette formule, qui paraît la plus simple, n'est point la plus commode.

*Deuxième formule.* — Si l'on chasse les dénominateurs dans la formule [1], il vient

$$V_1 P_1 = V_0 P_0 ;$$

on aurait de même, pour d'autres conditions $V_2 P_2$,

$$V_2 P_2 = V_0 P_0 \ldots = V_1 P_1.$$

On peut donc écrire

$$[2] \qquad V_0 P_0 = \text{constante}.$$

Telle est la formule la plus commode pour les calculs.

On peut l'énoncer en disant que, pour une masse de gaz donnée, maintenue à une même température, *le produit du volume par la pression est un nombre constant.*

1. Voir le détail de ces expériences dans la *Physique* de Violle, t. Ier.

*Troisième formule.* — Dans l'expérience du tube de Mariotte, la masse d'air renfermée dans le tube restant la même, son poids spécifique devient nécessairement d'autant plus grand que son volume devient plus petit. Si $p$ est le poids constant du gaz, $V_0$ et $D_0$ son volume et son poids spécifique à la pression $P_0$, $V_1$ et $D_1$ son volume et son poids spécifique à la pression $P_1$, on aura évidemment

$$p = V_0 D_0 = V_1 D_1;$$

de là on tire

$$V_0 D_0 = V_1 D_1 \quad \text{et} \quad \frac{D_1}{D_0} = \frac{V_0}{V_1},$$

et comme

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{P_1}{P_0}, \quad \text{on a} \quad \frac{D_1}{D_0} = \frac{P_1}{P_0}. \qquad [3]$$

Cette équation exprime une conséquence directe de la loi de Mariotte, qui pourrait lui servir de troisième énoncé, c'est que, *à une même température, le poids spécifique d'un gaz est proportionnel à la pression qu'il supporte.* Par exemple, sous la pression ordinaire de l'atmosphère, la densité de l'air étant 773 fois moindre que celle de l'eau, sous une pression de 773 atmosphères l'air aurait la même densité que l'eau, si à une telle pression il était encore gazeux.

## MANOMÈTRES.

230. **Définition et classification.** — Tous les appareils qui ont servi à la vérification de la loi de Mariotte, depuis le simple tube de Mariotte jusqu'aux appareils perfectionnés de Regnault et des derniers expérimentateurs, se composent de deux parties : 1° un vase clos, de forme variable, dans lequel on comprime ou bien l'on dilate la masse gazeuse; 2° un tube à mercure, ouvert ou fermé, dans lequel on mesure le degré de compression ou de raréfaction du gaz. Cette deuxième partie peut être construite à part : elle constitue, sous le nom de *manomètre* (de μανὸς, rare, peu dense, et μέτρον, mesure), un instrument spécial, employé en physique et dans l'industrie pour mesurer la *pression* des gaz et la *tension* des vapeurs, pris dans des conditions quelconques.

L'unité de mesure pour les pressions ou tensions est l'*atmosphère* telle que nous l'avons définie ci-dessus, c'est-à-dire la pression atmosphérique *normale* qui correspond à la hauteur barométrique de 76 centimètres. On a vu (194) que cette pression est égale à $1^{kg},033$ par centimètre carré; par conséquent, si l'on dit



d'un gaz qu'il a une tension de 2 ou de 3 atmosphères, cela signifie que sa force élastique ferait équilibre au poids d'une colonne de mercure de 2 fois ou 3 fois 76 centimètres de hauteur; ou, en d'autres termes, qu'il exerce sur chaque centimètre carré des parois de son récipient une pression égale à 2 ou 3 fois $1^{kg},033$.

On construit trois sortes de manomètres, d'après trois principes bien distincts :

1° Les *manomètres à air libre*, dans lesquels la force élastique à mesurer est équilibrée directement par une colonne de mercure ou d'un autre liquide, qui s'élève plus ou moins haut dans un tube ouvert : les grandes branches des appareils de Dulong (226) et de Regnault (227) sont des types de manomètres à air libre;

2° Les *manomètres à air comprimé*, dans lesquels la force élastique à mesurer est équilibrée par celle d'une masse d'air comprimée en vase clos et prise pour terme de comparaison;

3° Les *manomètres métalliques*, dans lesquels la force élastique à mesurer est équilibrée par l'élasticité d'un ressort circulaire qui s'enroule ou se déroule plus ou moins, comme celui du baromètre de Bourdon.

A un autre point de vue, on peut classer ces instruments en *manomètres de précision*, qui servent dans les recherches de laboratoire, et *manomètres industriels*, qui sont employés à divers usages dans l'industrie. Parmi les premiers nous décrirons :

Les *manomètres de Regnault;*

Le *manomètre différentiel de Kretz;*

Le *manomètre de M. Cailletet.*

Ce sont tous des *manomètres à air libre.*

Comme manomètres industriels, nous décrirons :

Le *manomètre ordinaire à air libre*, qui sert pour des pressions peu élevées ; le *manomètre de Desgoffe*, autre modèle du manomètre à air libre, qui peut servir commodément jusqu'à de hautes pressions; puis divers modèles de *manomètres à air comprimé;* enfin le *manomètre de Bourdon*, qui est le plus ancien et le plus usuel des manomètres métalliques.

231. **Manomètres de Regnault.** — Dans ses recherches sur la compressibilité et sur la dilatation des gaz, Regnault a employé trois modèles de manomètres *de précision.*

1° *Grand manomètre à air libre.* — Le plus grand de tous fut le manomètre à air libre qui fait partie de son grand appareil (fig. 250) : il peut servir à mesurer les pressions jusqu'à 27 atmosphères environ.

2° *Petit manomètre à air libre.* — Un autre modèle de manomètre à air libre lui a servi pour les pressions qui ne dépassent

pas 3 atmosphères. Il se compose de deux larges tubes en verre, A et B (fig. 251), mastiqués dans les branches A′ et B′ d'une pièce en fonte, deux fois recourbée à angle droit, creusée d'un canal intérieur et munie d'un robinet R à trois voies. L'ensemble

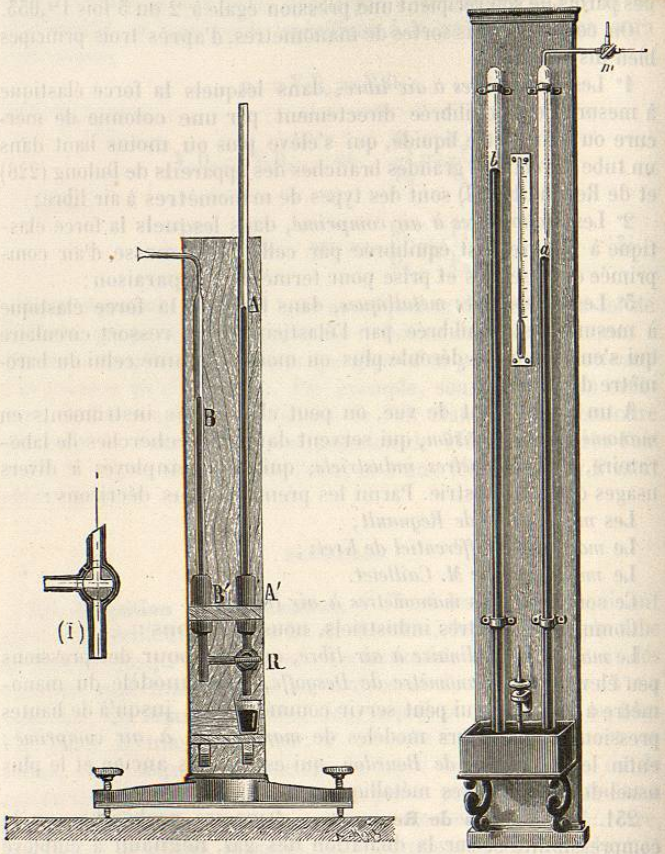


Fig. 251.




Fig. 252.

forme donc un système de vases communicants dans lesquels on peut verser du mercure. Le grand tube est ouvert librement à l'air ; le tube court, B, peut se relier, à l'aide d'un collier à gorge, avec le récipient à gaz où l'on veut mesurer la pression. Quand cette communication est établie, le robinet étant dans la position



normale (figurée en I), la pression du gaz se transmet au mercure de la grande branche : le niveau monte en A, tandis qu'il baisse en B ; la différence de ces niveaux, $h_0$ (réduite à 0°), augmentée de la hauteur barométrique actuelle (également réduite à 0°), mesure exactement la force élastique du gaz. On a

$$F = h_0 + H_0.$$

On détermine $h_0$ soit à l'aide d'échelles en millimètres tracées sur les tubes mêmes, soit, pour plus de précision, par des lectures au cathétomètre.

Tout l'appareil est fixé sur une planchette verticale, qui est posée sur un pied à vis calantes. On verra plus loin, à propos du voluménomètre (240), les usages du robinet à trois voies.

3° *Manomètre barométrique* ou *baromètre différentiel.* — Pour mesurer les faibles tensions, Regnault a adopté un manomètre qui est une modification de son baromètre normal. A côté du tube barométrique est fixé un second tube *a* d'égal diamètre, plongeant dans la même cuvette (fig. 252). Ce tube, ouvert à ses deux bouts, est en communication à sa partie supérieure avec une tubulure à trois branches *m* munie d'un robinet à trois voies, par où il est mis en rapport avec le récipient qui contient le gaz à faible tension. Plus la raréfaction est poussée loin dans celui-ci, plus le mercure s'élève dans le tube *a*, et c'est la différence de niveau dans les tubes *b* et *a* qui fait connaître la tension. Il n'y a donc qu'à mesurer la hauteur *ab* à l'aide du cathétomètre pour avoir avec précision la force élastique du gaz.

Cet appareil se désigne sous le nom de *baromètre différentiel*, à cause de sa forme, et sous celui de *manomètre différentiel*, à cause de son usage.

232. **Manomètres à liquides moins denses que le mercure.** — Pour la mesure des faibles pressions il y a intérêt à substituer au mercure, dans les manomètres à air libre, un liquide moins dense, pourvu que ce liquide n'émette pas de vapeurs sensibles à la température ordinaire. En prenant l'acide sulfurique, qui satisfait à ces conditions et qui est environ 7 fois 1/2 moins dense que le mercure, une variation de pression sera accusée par une colonne liquide 7 fois 1/2 plus haute que le mercure : on aura un instrument *sept fois et demie plus sensible* que le manomètre ordinaire, ou qui permettra d'évaluer, *avec une égale précision*, des pressions *sept fois et demie moins fortes.*

Avec un manomètre à eau, on aurait une sensibilité 13 fois 1/2 plus grande.

233. **Manomètre différentiel de M. Kretz.** — *Principe.* — C'est un manomètre de précision, à air libre, construit avec deux liquides qui sont tous les deux à peu près de même densité et tous les deux beaucoup moins lourds que le mercure. La sensibilité de cet instrument est environ 29 fois plus grande que celle d'un manomètre ordinaire à eau ; nous allons démontrer que, en gé-