CHAPITRE III

DENSITÉS DES GAZ

244. **Définitions.** — D'après la définition générale (98), on doit appeler *densité* ou *masse spécifique* d'un gaz, dans des conditions déterminées de température et de pression, la *masse d'un centimètre cube* de ce gaz, pris dans ces conditions. Ce serait aussi le quotient de la masse (vulgairement poids) d'un certain volume de gaz par la masse (vulgairement poids) du même volume d'eau. — Les nombres qu'on obtiendrait ainsi et qu'on peut appeler *densités* ou *poids spécifiques des gaz par rapport à l'eau*, sont essentiellement variables avec es conditions de température et de pression. On préfère introduire dans les calculs les *densités* prises *par rapport à l'air.*

On appelle, en général, *densité* d'un gaz, *le rapport entre les poids de deux volumes égaux de ce gaz et d'air, pris dans des conditions identiques de température et de pression.* — Quand il s'agit d'un gaz auquel la loi de Mariotte est applicable aussi bien qu'à l'air, et quand le coefficient de dilatation du gaz est le même que celui de l'air, ce rapport est *indépendant des conditions de température et de pression*, pourvu que ces conditions restent les mêmes pour le gaz et pour l'air. On voit, en effet, que des volumes égaux de ce gaz et d'air resteront toujours égaux entre eux, quelles que soient les variations de température et de pression.

Mais il n'en serait plus de même pour un gaz qui ne suivrait pas la loi de Mariotte (139), et dont le coefficient de dilatation différerait notablement de celui de l'air (243). — Dès lors, pour définir avec précision la densité d'un gaz, il faut convenir *d'une température et d'une pression particulières*, sous lesquelles la détermination devra être effectuée. On a choisi la température de 0° et la pression de 76 centimètres. — On appelle alors plus particulièrement *densité* d'un gaz, *le rapport entre les poids de deux volumes égaux du gaz et d'air, pris l'un et l'autre à 0° et sous la pression de 76 centimètres.*

245. **Détermination des densités des gaz ; méthode de Regnault.** — La méthode employée par Regnault consiste essentiellement dans les deux opérations suivantes : — 1° détermination du poids de gaz qui remplit, à 0° et sous une pression voisine de 76^{cm}, un ballon de verre d'une grande capacité ; on en conclut, au moyen de la loi de Mariotte, le poids du gaz qui remplirait le ballon à 0° et sous la pression de 76^{cm} ; — 2° détermination, par une seconde expérience, du poids d'air qui remplit le même ballon, dans des conditions semblables : on en déduit le poids de l'air qui le remplirait à 0° et 76^{cm}. — Voici comment on effectue ces deux déterminations.

1° Le ballon A (*fig.* 198), qui doit servir aux expériences, est fermé à sa partie supérieure par une monture à robinet R ; on le place dans la glace fondante et on le met en communication, par le tube à trois branches T, d'une part avec la machine pneumatique ; d'autre part, par l'intermédiaire de tubes desséchants, avec l'appareil producteur du gaz. Des robinets, qui ne sont pas représentés sur la figure, permettent d'intercepter ou de rétablir à volonté ces communications. — Après avoir fait le vide dans le ballon, on laisse entrer le gaz sur lequel doit porter l'expérience ; on fait le vide de nouveau, et l'on recommence cinq ou six fois la même manipulation. Après la dernière rentrée de gaz, on laisse quelques instants le ballon en communication avec l'atmosphère, et l'on ferme le robinet R : on observe la pression barométrique H. — On retire le ballon de la glace, on l'essuie, et on le laisse reprendre la température du laboratoire ; on le suspend sous l'un des plateaux de la balance, et l'on en fait la tare, comme nous l'indiquerons plus loin.

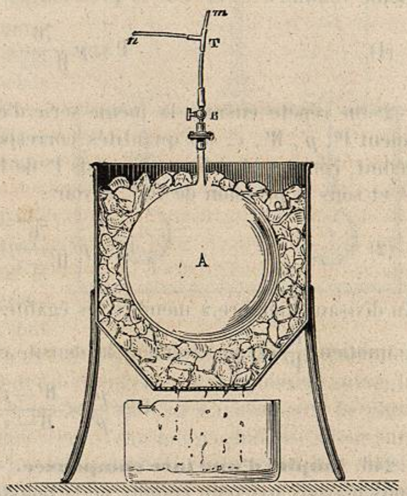

Fig. 198.

Il est clair que, si l'on pouvait maintenant extraire complètement le gaz, la perte de poids que le ballon éprouverait donnerait le poids de gaz qui le remplit à 0° et sous la pression H. Mais on sait que les meilleures machines pneumatiques ne peuvent faire un vide absolu : on a recours alors au procédé suivant, qui conduit à un résultat équivalent.

— On replace le ballon dans la glace, et, au moyen du tube T, on le remet en communication, d'une part avec la machine pneumatique, d'autre part avec un manomètre barométrique comme celui de la figure 137. On se contente de faire le vide autant que possible, et on lit, sur le manomètre, la tension ε du gaz restant. On ferme enfin le robinet R, on détache les tubes, et on replace le ballon sous le plateau de la balance, après avoir pris les mêmes précautions que plus haut. Le poids p, qu'il faut ajouter du côté du ballon, exprime le poids de gaz qui a été enlevé par la machine, c'est-à-dire celui qui occuperait le volume du ballon à 0° et sous la pression $H-\varepsilon$ (150); on en déduit, en appliquant la loi de Mariotte, le poids P de gaz qui remplirait le même volume à 0° et sous la pression de 76^{cm}, savoir :

$$(1) \qquad P = p\,\frac{76}{H-\varepsilon}.$$

2° On répète ensuite la même série d'expériences avec de l'air sec. soient P', p', H', ε', les quantités correspondantes à P, p, H, ε; on en déduit, comme plus haut, le poids P' de l'air qui emplirait le ballon à 0° et sous la pression de 76^{cm}, savoir :

$$(2) \qquad P' = p'\,\frac{76}{H'-\varepsilon'}.$$

En divisant membre à membre les égalités (1) et (2), et observant que le quotient $\frac{P}{P'}$ est précisément la densité cherchée D, on a

$$D = \frac{p}{p'} \times \frac{H'-\varepsilon'}{H-\varepsilon}.$$

246. **Emploi d'une tare compensée.** — Dans l'exposé qui précède, nous n'avons pas tenu compte de la poussée qu'éprouve le ballon, de la part de l'air extérieur. — Or, considérons d'abord les opérations qui ont fourni le poids p du gaz extrait du ballon. Si, lors des deux pesées, effectuées sur le ballon plein de gaz et sur le ballon vide, l'air extérieur n'a subi aucune modification de température, de pression ou d'humidité, la poussée est, par cela même, demeurée *constante*, et le poids p est bien celui du gaz enlevé par la machine. Mais si les conditions atmosphériques ont changé entre ces deux pesées, le poids de l'air déplacé par le ballon a augmenté ou diminué d'une certaine quantité; dès lors, le poids p qu'il a fallu pour rétablir l'équilibre représente le poids de gaz extrait par la machine, augmenté ou diminué de cette même quantité. Mêmes remarques pour les deux pesées qui donnent p'.

Les physiciens qui, avant Regnault, s'étaient occupés de la recherche des densités des gaz, Biot et Arago d'abord, MM. Dumas et Boussingault ensuite, avaient cherché à déterminer exactement les conditions

atmosphériques, au moment de chacun des quatre équilibres, afin d'en déduire chacune des valeurs de la poussée, et d'en tenir compte dans le calcul. Mais ces corrections présentent toujours une certaine incertitude, qui peut entraîner des erreurs correspondantes dans les résultats. — Regnault a préféré se placer dans des conditions où l'on n'eût à effectuer aucune correction de ce genre.

A cet effet, on établit la tare du ballon, non pas avec des corps quelconques, mais à l'aide d'un second ballon A' (*fig.* 199), fabriqué avec le même verre, et présentant *exactement* le même volume extérieur que celui qui sert aux expériences (*). On introduit, dans ce ballon-tare, un poids de mercure tel que, lorsque les deux ballons pleins d'air sont accrochés sous les plateaux de la balance, il faille, pour établir l'équilibre, ajouter une vingtaine de grammes du côté du ballon à robinet.

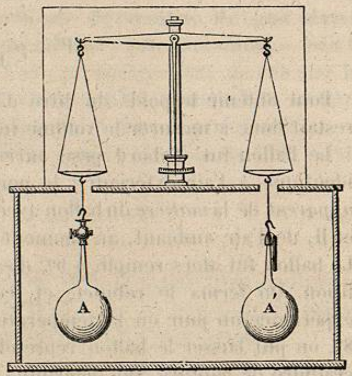

Fig. 199.

La cage de la balance est placée au-dessus d'une armoire vitrée, dont l'air est desséché par de la chaux vive; c'est dans l'atmosphère de cette armoire que sont suspendus les ballons. — Les deux ballons A et A' éprouvent toujours des poussées égales, quels que soient les changements qui puissent survenir dans la température ou dans la pression de l'air environnant. De plus, comme ils sont formés du même verre, l'eau qui se condense à leur surface, en vertu de la propriété hygrométrique du verre, peut être considérée comme étant en égale quantité sur chacun d'eux. — L'expérience montre d'ailleurs que l'équilibre, une fois établi, persiste indéfiniment.

247. **Densités des gaz par rapport à l'eau.** — Les densités des gaz *par rapport à l'air* étant connues, il suffit, pour obtenir leurs densités *par rapport à l'eau*, c'est-à-dire les masses de l'unité de volume, de multiplier chacune de ces densités par la densité de l'air par rapport à l'eau. C'est ce que montre un raisonnement semblable

(*) Pour obtenir deux ballons de même volume extérieur, on commence par les choisir de volumes peu différents; on prend le plus grand des deux pour le ballon A qui doit recevoir le gaz; au plus petit ballon A' on adapte une simple virole métallique, terminée par un crochet. On les emplit d'eau et on détermine exactement leurs volumes extérieurs, par la perte de poids qu'ils éprouvent quand on les plonge dans l'eau : supposons que l'on trouve, entre les volumes, une différence de 25 centimètres cubes; pour achever la compensation, on façonne à la lampe un tube de verre fermé aux deux bouts, de manière qu'il éprouve dans l'eau une perte de poids de 25 grammes : ce tube, suspendu à la virole du ballon A' comme le montre la figure 199, formera avec lui un volume total égal à celui du ballon A.

à celui qui a été fait pour les corps solides solubles dans l'eau, dont nous avons déterminé d'abord la densité par rapport à un autre liquide (106). Il reste donc à obtenir la densité de l'air, c'est-à-dire la masse d'un centimètre cube d'air à 0^o et sous la pression de 76 centimètres; c'est ce qu'a fait Regnault en déterminant avec précision le poids (ou mieux la masse) du litre d'air.

248. **Poids du litre d'air.** — Les expériences qui précèdent font déjà connaître le poids P' de l'air qui remplirait le ballon A (*fig.* 198) à 0^o et sous la pression de 76^{cm}, savoir :

$$P'=p'\frac{76}{H'-\varepsilon'}.$$

Pour obtenir le poids du litre d'air dans ces mêmes conditions, il restait donc à mesurer le volume intérieur V_0 du ballon.

Le ballon fut d'abord pesé *ouvert*, c'est-à-dire contenant de l'air identique à l'air extérieur : le poids obtenu π_1 représentait le *poids apparent* de la *matière* du ballon avec sa monture, dans les conditions t_1, et H_1 de l'air ambiant, au moment de cette première expérience. — Le ballon fut alors rempli, à 0^o, d'eau distillée purgée d'air par ébullition. On ferma le robinet, et, comme on avait choisi pour cette expérience un jour où la température extérieure t_2 était inférieure à 8^o, on put laisser le ballon reprendre la température ambiante, sans craindre de rupture. On détermina alors son poids π_2. Le nombre π_2 représentait la somme du *poids apparent* de la matière du ballon, avec sa monture, et du *poids apparent* de l'eau, dans les conditions t_2 et H_2 de l'air ambiant au moment de cette seconde expérience. — La différence $\pi_2 - \pi_1$ exprimait le *poids apparent* de l'eau, dans les conditions t_2 et H_2, en négligeant seulement la petite *variation de poussée* qu'avait pu éprouver la matière du ballon et de sa monture, en passant des conditions t_1 et H_1 aux conditions t_2 et H_2. — On avait donc, en désignant par Q le poids réel de l'eau qui occupait à 0^o le volume V_0 et par P_2 le poids du même volume d'air à la température t_2 et sous la pression H_2 :

$$(1) \qquad \pi_2-\pi_1=Q-P_2.$$

Pour calculer P_2, il suffit des données de l'une des expériences effectuées avec le ballon plein d'air sec à 0^o (245) : en effet, p' étant le poids d'air qui remplit le volume V_0 à 0^o et sous la pression $H'-\varepsilon'$, on a

$$P_2=p'\frac{H_2}{H'-\varepsilon'}\times\frac{1}{1+\alpha t_2}.$$

En tirant, de l'équation (1), la valeur du poids de l'eau Q, évaluée en kilogrammes, et divisant par e_0 la densité connue de l'eau à 0^o (234), on a le volume V_0 du ballon, en litres,

$$V_0=\frac{\pi_2-\pi_1+P_2}{e_0}.$$

Le quotient de P' par V_0 est le poids du litre d'air sec, à 0^o et sous la pression de 76 centimètres. — On trouve ainsi sensiblement $1^{gr},293$.

Le poids (ou mieux la masse) du litre d'air étant $1^{gr},293$, la masse *d'un centimètre cube* d'air est $0^{gr},001293$, c'est-à-dire que la *densité* de l'air par rapport à l'eau, ou le *poids spécifique* de l'air par rapport à l'eau, sont représentés par le nombre abstrait 0,001293.

249. **Calcul du poids d'un volume déterminé de gaz dans des conditions données de température et de pression.** — Soit D la densité d'un gaz par rapport à l'air; proposons-nous de calculer le poids (ou mieux la masse) P, en grammes, d'un volume V de ce gaz, exprimé en centimètres cubes, à t degrés, et sous la pression H.

Le volume occupé par ce gaz, à 0^o et sous la pression de 76^{cm}, serait (240) :

$$V_0=V\frac{H}{76}\times\frac{1}{1+\alpha t}.$$

D'autre part, à 0^o et sous la pression de 76^{cm}, la masse d'un centimètre cube de gaz (247) est égale à $0^{gr},001293\times D$; et par suite la masse (vulgairement le poids) du gaz sera donnée par l'expression

$$P=V\times 0,001293\frac{H}{76}\frac{D}{1+\alpha t}.$$

Si le volume V était exprimé en litres, et si l'on voulait obtenir P en grammes, on remplacerait dans la formule le poids du centimètre cube d'air par le poids du litre d'air $1^{gr},293$.

250. **Détermination des densités des gaz qui attaquent les métaux.** — La méthode que nous avons exposée (245) ne peut s'appliquer à des gaz capables d'attaquer les garnitures métalliques des ballons. — Voici comment on peut opérer, pour le chlore, par exemple :

Fig. 200.

On prend un flacon de verre, de 1 à 2 litres de capacité (*fig.* 200), se fermant avec un bouchon à l'émeri. Ce flacon étant entouré de glace fondante, on l'emplit de chlore sec, en suivant le procédé qu'on indique en chimie : on place le bouchon, et l'on note la pression H de l'atmosphère. On laisse reprendre au flacon la température du laboratoire, on l'essuie, et l'on en fait la tare au moyen d'un autre vase ayant approximativement le même volume extérieur. — On le reporte dans la glace et l'on chasse le chlore par un courant d'air sec : on le bouche, et l'on note la pression H'. Le flacon étant replacé sur la balance, on trouve qu'il faut, pour rétablir l'équilibre avec la même tare, ajouter un poids π à côté du flacon. — Si l'on représente par p le poids de chlore que contenait le flacon à 0^0 et sous la pression H, par p' le poids d'air qu'il contenait à 0^0 et sous la pression H', on a :

$$p = p' + \pi.$$

Or, si l'on a préalablement déterminé le volume V_0 du flacon à 0^0, le poids p' de l'air qu'il contenait pendant la pesée est égal à $V_0 \times 0^{gr},001293 \times \frac{H'}{76}$. En ajoutant π à l'expression ainsi calculée, on connaît le poids p de chlore sur lequel on a opéré. — On en déduit le poids P de chlore qui remplirait le flacon à 0^0 et sous la pression de 76 centimètres, savoir :

$$P = p \times \frac{76}{H}.$$

Pour obtenir la densité du gaz, il suffira de diviser P par le poids du même volume d'air, savoir $V_0 \times 0^{gr},001293$.

Nous avons supposé connu le volume V_0 du flacon : pour obtenir ce volume on détermine par l'expérience l'excès π_1 du poids du flacon plein d'eau à 0^0, sur le poids du flacon plein d'air à 0^0 et sous la pression H'. Le poids de l'eau étant représenté par $V_0 \times 0^{gr},999873$ et celui de l'air par $V_0 \times 0^{gr},001293 \times \frac{H'}{76}$, on aura :

$$\pi_1 = V_0 \left(0^{gr},999873 - 0^{gr},001293 \times \frac{H'}{76}\right),$$

équation dont on déduira la valeur de V_0.

251. **Résultats.** — Le tableau suivant donne les densités d'un certain nombre de gaz par rapport à l'air; la plupart de ces nombres ont été déterminés par Regnault (*).

	DENSITÉS par rapport à l'air.
Air	1,0000
Hydrogène	0,0693
Azote	0,9714
Oxygène	1,1056
Chlore	2,4700
Cyanogène	1,8064
Acide sulfureux	2,2500
Acide carbonique	1,5290
Oxyde de carbone	0,9680
Protoxyde d'azote	1,5269
Bioxyde d'azote	1,0388

(*) Chacun des nombres de ce tableau permettra d'obtenir, pour le gaz auquel il se rapporte, et par un calcul simple : la *densité absolue*, la *densité relative*, le *poids spécifique relatif* et le *poids spécifique absolu* du gaz auquel il correspond. — Par exemple, pour l'oxygène, le produit $0^{gr},001293 \times 1.1056 = 0^{gr},001429$ est la densité absolue, ou masse spécifique. — Ce même nombre 0,001429, considéré comme abstrait, représente la densité ou le poids spécifique de l'oxygène par rapport à l'eau. — Pour avoir le poids spécifique absolu de l'oxygène, il faudrait multiplier sa masse spécifique par l'intensité de la pesanteur, qui est 981 dynes, à Paris.

CHAPITRE IV

APPLICATIONS DES DILATATIONS

I. — APPLICATIONS DES DILATATIONS DES CORPS SOLIDES.

252. **Corrections des mesures linéaires.** — Supposons qu'une règle ait été divisée en millimètres, à une température θ. Si l'on fait usage de cette règle pour mesurer une longueur, et si la température a une valeur notablement différente t, on remarquera que chaque division aura pris une longueur de $1^{mm}[1 + l(t - \theta)]$, en désignant par l le coefficient de dilatation linéaire de la règle. Si donc la lecture faite sur la règle donne un nombre n de divisions, la valeur L de la longueur mesurée sera

$$L = n\left[1 + l(t - \theta)\right].$$

253. **Pendules compensateurs.** — On met à profit l'isochronisme des petites oscillations du pendule (59) pour régulariser le mouvement des horloges, en rendant ce mouvement solidaire de celui d'un pendule ou *balancier*. Mais, si l'on veut éviter que les variations de température viennent, en modifiant la longueur du balancier, faire avancer ou retarder l'horloge, il faut faire usage de balanciers spéciaux, qu'on désigne sous le nom de *pendules compensateurs*.

Les balanciers qu'on emploie le plus ordinairement se terminent, à leur partie inférieure, par une lentille dont le poids l'emporte de beaucoup sur celui du reste de la partie oscillante. La *longueur* du pendule simple, qui ferait son oscillation dans le même temps, diffère alors peu de la distance du point de suspension au centre de gravité de la masse pesante; c'est cette distance que l'on cherche à rendre indépendante de la température.