

degré trop élevé en α pour qu'on puisse la résoudre directement. Pour en déduire la valeur de α , Regnault employait une méthode de calcul particulière, que nous ne pouvons indiquer ici. Nous nous contenterons de faire remarquer que, si la température extérieure n'a pas changé pendant l'expérience, et si cette température est aussi celle de l'eau qui entoure le manomètre, on aura $t = t' = \theta$; si l'on a, en même temps $H' = H$, l'équation devient

$$V_0 = \frac{V_0(1 + kT)}{1 + \alpha T} + \frac{u}{1 + \alpha t},$$

équation d'où il est facile de tirer la valeur de α .

Pour l'air en particulier, le calcul exact, appliqué aux données de l'expérience, a donné pour le coefficient de dilatation α la valeur 0,00567, qui a été adoptée par les physiciens.

244. Valeurs des coefficients de dilatation des divers gaz, sous pression constante. — Le tableau suivant donne, pour quelques gaz, les résultats fournis par les expériences de Regnault, sous une pression sensiblement égale à la pression atmosphérique.

	COEFFICIENTS DE DILATATION.
Hydrogène	0,005661
Air	0,005670
Oxyde de carbone	0,005669
Acide carbonique	0,005710
Protoxyde d'azote	0,005719
Cyanogène	0,005877
Acide sulfureux	0,005905

On voit que les trois premiers gaz ont des coefficients de dilatation sensiblement égaux. — Pour les autres gaz, le coefficient de dilatation acquiert des valeurs d'autant plus grandes, qu'il s'agit d'un gaz plus voisin de son point de liquéfaction.

A la suite de ces expériences, Regnault en a fait d'autres, pour étudier les dilatations des gaz sous des pressions *supérieures à la pression atmosphérique*, la pression conservant d'ailleurs toujours sensiblement une même valeur pendant la durée d'une même expérience. — Il a trouvé que, pour l'hydrogène ou l'air, le coefficient de dilatation reste sensiblement indépendant de la pression. — Pour les gaz facilement liquéfiables, comme l'acide carbonique ou l'acide sulfureux, le coefficient de dilatation augmente notablement, à mesure que la pression sous laquelle on opère est plus considérable.

En résumé, les recherches de Regnault conduisent à conclure, ainsi que nous l'avons indiqué en commençant, que la loi de Gay-Lussac, même avec l'extension indiquée par les expériences de Davy (258), peut être appliquée, sans erreur sensible, au calcul des variations de volume des gaz, mais seulement quand il s'agit de gaz suffisamment éloignés de leur point de liquéfaction.

CHAPITRE III

DENSITÉS DES GAZ

245. Définitions. — D'après la définition générale des poids spécifiques (96), on doit appeler *poids spécifique* d'un gaz, dans des conditions déterminées de température et de pression, le *poids de l'unité de volume* de ce gaz, pris dans les conditions énoncées. Ce serait le quotient du poids d'un certain volume du gaz par le poids d'un égal volume d'eau. — Les nombres que l'on obtiendrait ainsi, et qui expriment les poids spécifiques des gaz par rapport à l'eau, sont essentiellement variables avec les 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 (140), et dont le coefficient de dilatation différerait notablement de celui de l'air (244). — 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 760 millimètres.

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 760 millimètres*.

246. **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 760^{mm}, 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 760^{mm}; — 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 760^{mm}. — Voici comment on effectue ces deux déterminations.

1° Le ballon A (fig. 206), qui doit servir aux expériences, est fermé à sa

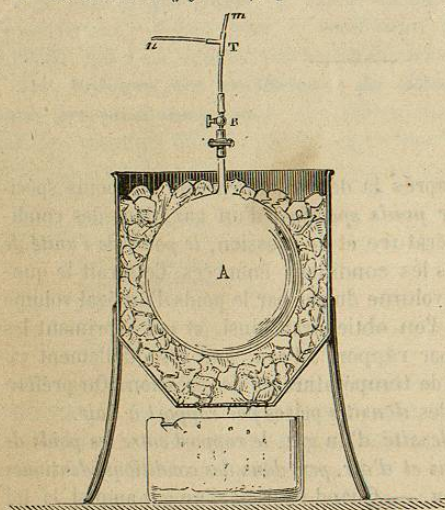


Fig. 206.

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 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.

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 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 154. 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 $H - \varepsilon$ (151); 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 760^{mm}, savoir :

$$(1) \quad P = p \frac{760}{H - \varepsilon}.$$

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 remplirait le ballon à 0° et sous la pression de 760 millimètres, savoir :

$$(2) \quad P' = p' \frac{760}{H' - \varepsilon'}.$$

En divisant membre à membre les égalités (1) et (2), et observant que le quotient $\frac{P}{P'}$ est précisément la densité cherchée d_0 , on a

$$d_0 = \frac{p}{p'} \times \frac{H' - \varepsilon'}{H - \varepsilon}.$$

247. **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. 207), fabriqué avec le

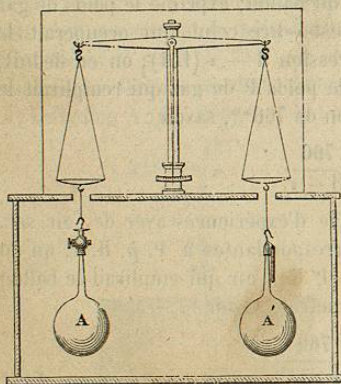


Fig. 207.

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 un vingtaine de grammes du côté du ballon à robinet.

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.

248. Poids spécifiques des gaz par rapport à l'eau. — Les densités des gaz étant connues par rapport à l'air, il suffit, pour obtenir leurs poids spécifiques par rapport à l'eau, c'est-à-dire les poids de l'unité de volume, de multiplier chacune de ces densités par le poids spécifique de l'air par rapport à l'eau. C'est ce que montre un raisonnement semblable à celui qui a été fait pour les corps solides solubles dans

(*) 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 A' on adapte une simple virole métallique, terminée par un crochet. On les emplit d'eau et l'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 207, formera avec lui un volume total égal à celui du ballon A.

l'eau, dont nous avons déterminé d'abord le poids spécifique par rapport à un autre liquide (105). Il reste donc à obtenir le poids d'un volume connu d'air, d'un litre d'air par exemple, à la température de 0° et la pression de 760 millimètres.

249. Poids du litre d'air. — Les expériences qui précèdent font déjà connaître le poids P' de l'air qui remplirait le ballon A (fig. 206) à 0° et sous la pression de 760 millimètres, savoir :

$$P' = p' \frac{760}{H' - \epsilon'}$$

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°, 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°, 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° 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 ,

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

Pour calculer P_2 , il suffit des données de l'une des expériences effectuées avec le ballon d'air sec à 0° (246) : en effet, p' étant le poids d'air qui remplit le volume V_0 à 0° et sous la pression $H' - \epsilon'$, on a

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

En tirant, de l'équation (1), la valeur du poids de l'eau Q, évaluée en kilogrammes, et divisant par la densité connue d_0 de l'eau à 0°, on a le volume V_0 du ballon, en litres,

$$V_0 = \frac{\pi_2 - \pi_1 + P_2}{d_0}.$$

Le quotient de P' par V_0 est le poids du litre d'air sec, à 0° et sous la pression de 760 millimètres. — On trouve ainsi sensiblement $1^{\text{er}},295$.

250. **Calcul des poids spécifiques des gaz par rapport à l'eau.** — Le poids d'un litre d'air étant $1^{\text{er}},295$, le poids d'un centimètre cube d'air est $0^{\text{er}},001295$; c'est-à-dire que le poids spécifique de l'air par rapport à l'eau, dans les conditions normales de température et de pression, est $0,001295$.

Le poids spécifique d'un gaz quelconque s'obtiendra en multipliant le nombre précédent par la densité D_0 du gaz, par rapport à l'air. — Par exemple, le poids spécifique de l'acide carbonique sera, dans les conditions normales de température et de pression, $0,001295 \times 1,529$.

251. **Calcul du poids d'un volume déterminé d'un gaz sec, dans des conditions données de température et de pression.** — Soit D_0 la densité d'un gaz par rapport à l'air, et proposons-nous de calculer le poids P , en grammes, d'un volume V de ce gaz, exprimé en litres, à t degrés et sous la pression H .

Le poids du litre d'air, dans les conditions données, serait, d'après ce qu'on a vu, $1^{\text{er}},295 \times \frac{H}{760} \times \frac{1}{1+at}$; par suite, le poids de V litres du gaz sera donné par l'expression

$$P = 1^{\text{er}},295 \times \frac{H}{760} \times \frac{1}{1+at} \times D_0 \times V.$$

* 252. **Détermination des densités des gaz qui attaquent les métaux.** — La méthode que nous avons exposée (246) ne peut s'appliquer à des gaz capables d'attaquer les garnitures métalliques des ballons. — Voici comment on peut alors opérer; nous prendrons comme exemple la détermination de la densité du chlore.

On prend un flacon de verre, de 1 à 2 litres de capacité (fig. 208), se fermant avec un bouchon à l'émeri. Ce flacon étant entouré de glace fondante, on l'empli 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

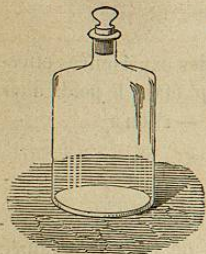


Fig. 208.

0° et sous la pression H , par p' le poids d'air qu'il contenait à 0° et sous la pression H' , on a

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

Or, si l'on a préalablement déterminé le volume intérieur V_0 du flacon à 0° , exprimé en litres, le poids p' de l'air qu'il contenait pendant la pesée est égal à $V_0 \times 1^{\text{er}},295 \times \frac{H'}{760}$. 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° et sous la pression de 760 millimètres, savoir:

$$P = p \times \frac{760}{H}.$$

Pour obtenir la densité du gaz, il suffira de diviser P par le poids du même volume d'air, savoir $V_0 \times 1^{\text{er}},295$.

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° , sur le poids du flacon plein d'air à 0° et sous la pression H' . Le poids de l'eau pouvant se représenter par $V_0 \times 999^{\text{er}},875$, et celui de l'air par $V_0 \times 1^{\text{er}},295 \times \frac{H'}{760}$, on aura:

$$\pi_1 = V_0 \left(999^{\text{er}},875 - 1^{\text{er}},295 \times \frac{H'}{760} \right),$$

équation dont on déduira la valeur de V_0 .

Cette méthode est semblable, comme on le verra plus loin (298), à celle qui a été employée par M. Dumas pour la détermination des densités des vapeurs.

255. **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 à 0° et sous la pression 760 ^{mm} par rapport à l'air.
Air	1,0000
Hydrogène	0,0695
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	1,0588