tous les coefficients peuvent être mesurés, on obtient la valeur de c dans les circonstances où l'on s'est placé.

2° *Résultats.* — *a.* L'expérience prouve que la première loi ne peut être considérée comme exacte que pour les gaz très peu solubles et jusqu'à une pression de 3 atmosphères. Même au-dessous de cette limite, la loi n'est pas applicable aux gaz notablement solubles, tels que l'acide sulfureux, l'acide chlorhydrique et le gaz ammoniac; elle n'est même pas rigoureuse pour l'acide carbonique.

b. La loi de Dalton peut être considérée comme exacte dans les mêmes limites que la première.

c. Le coefficient de solubilité diminue quand la température s'élève, suivant une loi qui n'est pas simple. D'après Bunsen, cette loi peut s'exprimer par une formule à trois termes

$$c = A - Bt - Ct^2,$$

où A, B, C sont des constantes qui varient avec la nature du gaz. Il les a déterminées pour un grand nombre de gaz.

d. Le coefficient de l'hydrogène présente cette anomalie d'être sensiblement indépendant de la température entre 0° et 20°.

245. **Application des lois de la dissolution des gaz.** — *Quelle est la composition, en volume, de l'air dissous dans l'eau, sachant que, à la température moyenne de* 10°, *le coefficient d'absorption de l'oxygène est environ* 0,046 *et celui de l'azote* 0,025?

Appelons H la pression atmosphérique; l'air contenant, sur 100 parties en volume, environ 21 parties d'oxygène et 79 parties d'azote, la pression de l'oxygène, considéré seul, est $\frac{21\,H}{100}$, et celle de l'azote $\frac{79\,H}{100}$. Les volumes de ces deux gaz qui sont dissous par un litre d'eau exposé à l'air libre, sont respectivement représentés par les coefficients de solubilité : ce sera donc $0^l,046$ pour l'oxygène et $0^l,025$ pour l'azote; mais ces deux volumes gazeux ne sont pas comparables entre eux, car ils ne sont pas à la même pression : l'oxygène est évalué à la pression que ce gaz exerce dans l'atmosphère, c'est-à-dire à $\frac{21}{100}$ H et l'azote à $\frac{79}{100}$ H. Pour les comparer, il faut donc les ramener préalablement à la même pression, par exemple à la pression H. On aura, en appliquant la loi de Mariotte : pour l'oxygène $vH = 0{,}046 \times \frac{21}{100}$ H, d'où $v = 0{,}046 \times 0{,}21$ et pour l'azote $v'H = 0{,}025 \times \frac{72}{100}$ H, d'où $v' = 0{,}025 \times 0{,}72$, d'où enfin

$$\frac{v'}{v} = \frac{0{,}025 \times 0{,}79}{0{,}046 \times 0{,}21} = \frac{1975}{966} = 2{,}04.$$

On voit donc que la proportion en volumes de l'azote dissous à l'oxygène dissous est environ 2 dans l'air dissous, tandis qu'elle est environ 4 dans l'air atmosphérique : celui-ci est donc moins riche en oxygène que l'air dissous.

CHAPITRE V

APPLICATIONS DE L'EXPANSIBILITÉ DES GAZ

—

MACHINES PNEUMATIQUES.

246. **Machine pneumatique ordinaire.** — 1° *Définitions.* — On appelle *machines pneumatiques* des appareils qui permettent de *faire le vide* dans un espace clos, ou plutôt d'y *raréfier* l'air ou les gaz qui y sont contenus (car on ne peut réaliser le vide absolu). Le plus ancien de ces appareils est celui qu'on appelle *machine pneumatique ordinaire*, qui est restée la machine classique par excellence.

2° *Historique.* — La première idée de la machine ordinaire est due à Otto de Guericke, bourgmestre de Magdebourg. Il en construisit (en 1650) un modèle rudimentaire, à un seul corps de pompe, qui lui suffit pourtant pour réaliser son expérience célèbre des *hémisphères de Magdebourg*[1] (191).

3° *Description.* — a. *Plate-forme, corps de pompe, platine, récipient.* — La machine actuelle se compose d'une épaisse plate-forme de laiton VGL (fig. 268 et 269), fixée horizontalement sur une table. A l'une de ses extrémités sont solidement mastiqués deux cylindres de cristal, où se meuvent deux pistons de cuir P, P′: ces cylindres sont les *corps de pompe.* A l'autre extrémité, la plate-forme se termine par une *platine* V, sur laquelle est mastiquée une glace de verre dépolie et bien dressée. C'est là-dessus qu'on place le *récipient* R, dans lequel on doit faire le vide[2]. Au centre de la platine est une tubulure n, à pas de vis, sur laquelle on adapte à volonté

1. Les principaux perfectionnements apportés à la construction de cette machine furent imaginés par Boyle (en 1659), par Papin (en 1687); et les derniers sont dus à Sengueard (en 1685), puis à Smeaton (1751).

2. C'est Papin qui substitua à l'ancien ballon d'Otto de Guericke ce dispositif commode d'une cloche posée sur une platine.

des ballons de verre à robinet, ou tous autres vases dans lesquels on veut faire le vide. La communication entre le récipient et les corps de pompe est établie par un conduit *nc* pratiqué dans la plate-forme (fig. 269, coupe longitudinale de la machine). En arrivant aux corps de pompe, le conduit se bifurque pour atteindre leurs bases en *c* et en *d* (fig. 272).

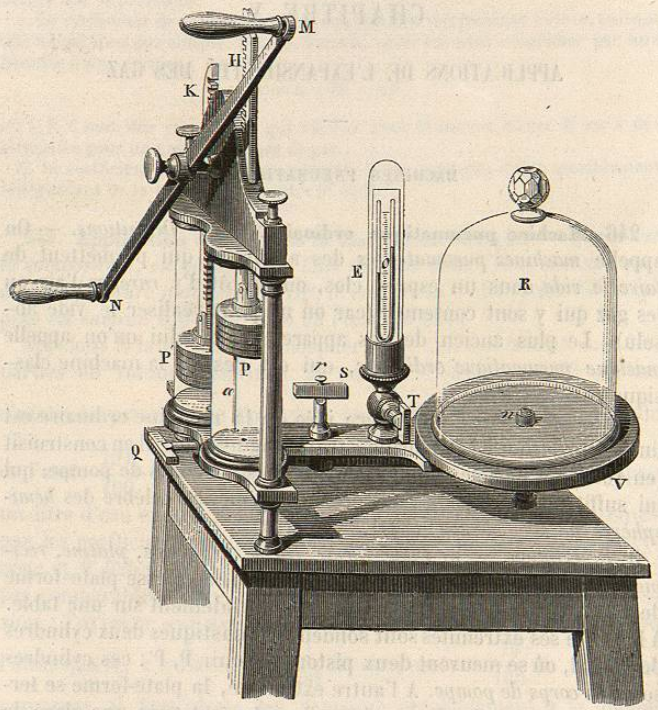

Fig. 268.

b. *Tiges à crémaillères.* — La figure 270, qui représente une coupe verticale de la machine suivant les axes des deux cylindres, montre le mécanisme à l'aide duquel on imprime un mouvement alternatif aux pistons. A ceux-ci sont fixées des crémaillères K et H, dans lesquelles engrène un pignon X. En faisant tourner ce pignon alternativement en sens contraires, au moyen d'une manivelle MN, l'une des crémaillères monte et l'autre descend, et avec elles les pistons[1].

c. *Pistons.* — Chaque piston se compose (fig. 271, coupe verticale) de deux disques de laiton A et B, entre lesquels sont des rondelles de cuir percées en leur centre et imbibées d'huile de pied de bœuf. Le disque B est surmonté d'une tubulure qui tra-

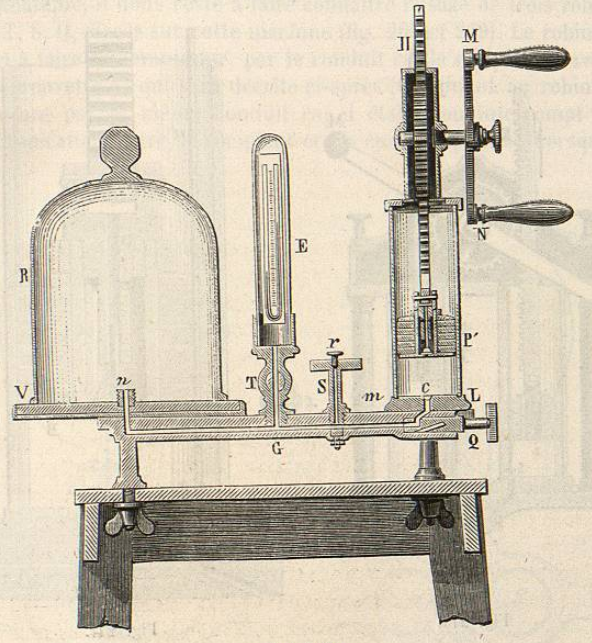

Fig. 269.

verse toutes les rondelles, et sur cette tubulure est un pas de vis sur lequel se serre un écrou qui comprime fortement le disque A et les rondelles. Celles-ci, d'un diamètre un peu plus grand que les disques A et B, glissent à frottement doux contre les parois du corps de pompe, qu'elles ferment hermétiquement. Dans l'intérieur de la tubulure centrale est vissée une pièce D, sur laquelle se fixe par un boulon la crémaillère qui fait mouvoir le piston. La pièce D est percée, dans toute sa hauteur, d'un conduit destiné à laisser

1. C'est à Boyle qu'est due l'adaptation, à la tige de chaque piston, d'une crémaillère engrenant avec une roue dentée.

passer l'air, de la partie inférieure du corps de pompe à la partie supérieure, et de là dans l'atmosphère (les corps de pompe n'étant pas hermétiquement clos dans le haut). Enfin, au centre du disque B est un trou *i*, fermé par une soupape métallique Z, qui s'ouvre de bas en haut. A cette soupape (représentée à gauche de la figure 271) est fixée une tige *e* qui s'engage librement dans le conduit de la pièce D. Ce dispositif a pour but d'empêcher la

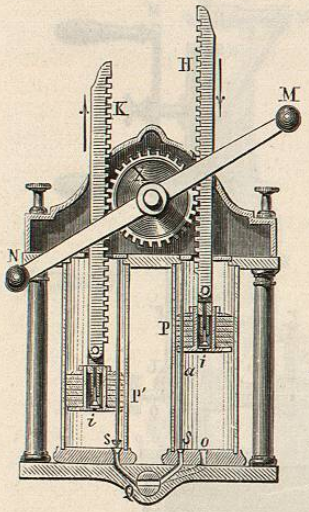

Fig. 270.

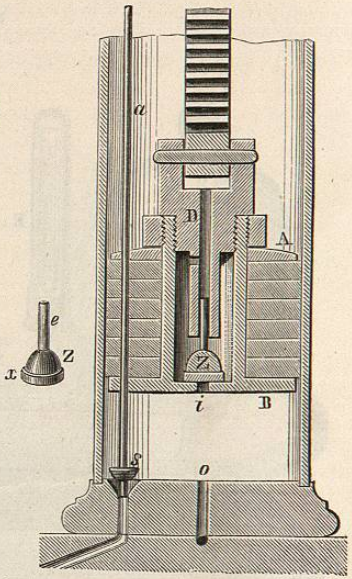

Fig. 271.

soupape de chavirer lorsqu'elle est soulevée. A la partie inférieure de la soupape est un disque de liège *x* qui s'applique sur l'orifice *i* et le ferme.

Outre la soupape Z placée à l'intérieur du piston, une soupape conique *s* sert à fermer, à la base du corps de pompe, l'orifice *c* du conduit *cn* qui se rend au récipient (fig. 269). Cette soupape est fixée à l'extrémité inférieure d'une tige de fer *a* (fig. 271), qui traverse tout le piston, et se prolonge jusqu'au sommet du corps de pompe. La tige *a* pouvant glisser à frottement dur dans les rondelles de cuir du piston, il en résulte que, lorsque celui-ci descend, il entraîne avec lui la tige de fer et fait fermer la soupape *s*;

s'il monte, la tige et la soupape sont soulevées, mais d'une très petite hauteur, parce que cette tige a une longueur telle, qu'elle vient buter tout de suite contre le plateau supérieur du corps de pompe[1]. Alors elle ne fait plus que glisser dans le piston, qui s'élève seul.

d. *Robinets.* — Pour compléter la description de la machine pneumatique, il nous reste à faire connaître l'usage de trois robinets T, S, Q, placés sur cette machine (fig. 268 et 269). Le robinet T sert à faire communiquer, par le conduit *cn*, le récipient R avec une éprouvette E, qui sera décrite ci-après (6°). Quant au robinet S, encore par le même conduit *cn*, il établit ou interrompt la communication entre le récipient et les corps de pompe. Lorsque

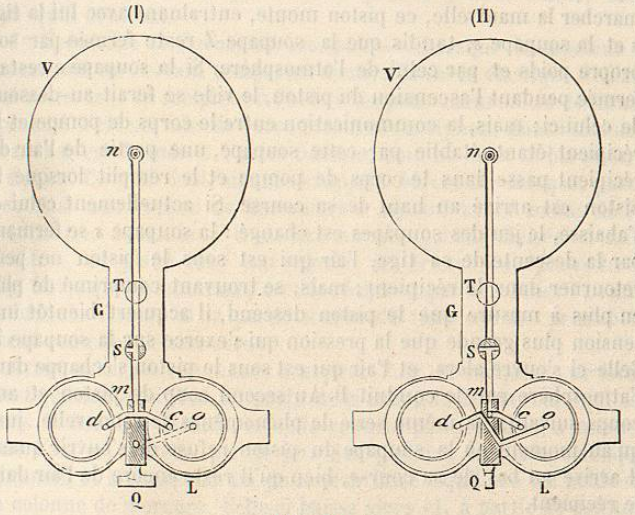

Fig. 272.

ceux-ci fonctionnent, le robinet S doit être ouvert (fig. 269 et 272, I), et alors l'air est aspiré du récipient; mais une fois que le vide est fait dans ce dernier, comme l'air tend toujours à rentrer par les corps de pompe, on tourne le robinet S d'un quart de tour (fig. 272, II) et l'air ne peut plus pénétrer dans le récipient qu'en s'infiltrant entre ses bords et la platine. C'est pourquoi ces bords

1. Cette soupape à fonctionnement automatique est due à Papin. Elle remplaça un robinet, qu'il fallait manœuvrer à la main, après chaque coup de piston, dans la machine primitive d'Otto de Guericke.

doivent être dressés avec soin, de manière que le contact soit parfait; mais cela serait insuffisant : il faut encore, avant de les appliquer sur la platine, les enduire de suif. Le récipient, ainsi disposé, *tient le vide* des mois entiers.

Le robinet S est percé, suivant son axe, d'un conduit dont on ferme hermétiquement l'orifice à l'aide d'un bouchon métallique *r*. Le vide étant fait dans le récipient, lorsqu'on veut y faire rentrer l'air, il suffit d'enlever le bouchon *r*[1]. Le troisième robinet Q, placé entre les deux corps de pompe, est destiné à l'opération du *double épuisement :* c'est le robinet dit *de Babinet*, que nous décrirons ci-après.

4° *Fonctionnement.* — Supposons d'abord le piston P′ (fig. 270 et 271) au bas de sa course. A l'instant où l'on commence à faire marcher la manivelle, ce piston monte, entraînant avec lui la tige *a* et la soupape *s*, tandis que la soupape Z reste fermée par son propre poids et par celui de l'atmosphère. Si la soupape *s* restait fermée pendant l'ascension du piston, le vide se ferait au-dessous de celui-ci; mais, la communication entre le corps de pompe et le récipient étant établie par cette soupape, une partie de l'air du récipient passe dans le corps de pompe et le remplit lorsque le piston est arrivé au haut de sa course. Si actuellement celui-ci s'abaisse, le jeu des soupapes est changé : la soupape *s* se fermant par la descente de sa tige, l'air qui est sous le piston ne peut retourner dans le récipient; mais, se trouvant comprimé de plus en plus à mesure que le piston descend, il acquiert bientôt une tension plus grande que la pression qui s'exerce sur la soupape Z. Celle-ci s'ouvre alors, et l'air qui est sous le piston s'échappe dans l'atmosphère par le conduit D. Au second coup de piston et aux coups suivants, la même série de phénomènes se renouvelle, jusqu'au moment où la soupape du piston refuse de s'ouvrir quand il arrive au bas de sa course, bien qu'il reste encore de l'air dans le récipient.

5° *Limite du fonctionnement.* — On a alors atteint ce qu'on appelle la *limite du vide*. Cela tient à ce que, si bien construite que soit une machine, on ne peut éviter, au-dessous des soupapes et sur le contour du disque inférieur du piston, un *espace nuisible* où se loge un petit résidu d'air. Par suite, lorsque la raréfaction est poussée assez loin, il arrive un moment où, lors même que le piston vient s'appliquer sur la base du corps de pompe, l'air qui reste enfermé dans l'espace nuisible n'acquiert pas une tension suffisante pour soulever la soupape; à partir de

1. L'adjonction de ce robinet pour la rentrée de l'air est due à Smeaton

cet instant la machine ne fonctionne plus. On verra ci-après (248) un dispositif de robinet qui permet de pousser le vide plus loin, sans pouvoir toutefois donner le vide absolu.

Du reste, indépendamment de cette cause mécanique qui limite pratiquement la raréfaction, il est théoriquement impossible que la machine pneumatique puisse faire le vide absolu. On peut s'en rendre compte approximativement de la manière suivante. Le volume de chaque corps de pompe, diminué de celui du piston, étant, par exemple, de 1 litre, et celui du récipient de 10 litres, lorsque le piston est arrivé au haut de sa course, le volume d'air, qui était 10, est 10 plus 1 ou 11; on extrait donc, à chaque coup de piston, seulement $\frac{1}{11}$ de la masse de l'air qui se trouvait dans le récipient; par conséquent on ne pourra jamais enlever tout l'air qu'il contient.

6° *Éprouvette* et *baromètre tronqué.* — Lorsque la machine a fonctionné un certain temps, on mesure la force élastique de l'air qui reste dans le récipient à l'aide d'un petit manomètre de forme spéciale. C'est un tube de verre recourbé en siphon, dont l'une des branches est fermée et l'autre ouverte, comme dans le baromètre à siphon. Ce petit instrument est appelé *baromètre tronqué*, parce que c'est une espèce de baromètre à siphon ayant moins de 76 centimètres de hauteur. Il est fixé sur une échelle divisée en millimètres, et placé sous une cloche de cristal ou *éprouvette* E (fig. 269), qui communique avec le récipient par le robinet T; enfin la branche fermée et la partie courbe du tube ont été préalablement remplies de mercure[1].

Avant qu'on ait commencé à aspirer l'air du récipient, sa force élastique fait équilibre au poids de la colonne de mercure qui est dans la branche fermée, et celle-ci reste pleine; mais, à mesure que l'air est raréfié par le jeu des pistons, la force élastique diminue, et bientôt elle ne peut plus faire équilibre au poids de la colonne de mercure. Celle-ci baisse alors et, à partir de cet instant l'instrument fonctionne comme manomètre : la différence des niveaux du mercure dans les deux branches du siphon mesure évidemment la force élastique du gaz qui reste dans le récipient et dans les conduits de la machine.

Si l'on arrivait à faire le vide absolu, les niveaux s'établiraient nécessairement sur un même plan horizontal; mais, avec les meilleures machines, le mercure reste toujours plus élevé d'un demi-millimètre au moins dans la branche fermée : cela prouve que le vide n'est pas parfait, puisqu'il reste encore une quantité d'air

1. Cet accessoire de la machine fut imaginé par Smeaton (en 1751).

dont la tension fait équilibre à une colonne de mercure d'un demi-millimètre. On dit alors qu'*on a fait le vide à un demi-millimètre.*

7° *Calcul des épuisements successifs : loi du fonctionnement de la machine.* — Il y a deux cas à considérer : celui où l'on ne tient pas compte de l'espace nuisible, — cas purement théorique, — et celui où l'on tient compte de l'espace nuisible.

Cas théorique (pas d'espace nuisible). — Soient R la capacité du récipient et du tube d'aspiration, C la capacité du corps de pompe, H_0 la pression initiale dans le récipient. Avant le premier coup de piston, le récipient contient une certaine masse d'air dont le volume est R et la force élastique H_0. On soulève le piston de l'un des corps de pompe, cette masse d'air se répand dans le cylindre : son volume devient $R+C$, et sa pression H_1. D'après la loi de Mariotte, on a

$$H_1(R+C) = H_0 R,$$

d'où

$$H_1 = H_0 \frac{R}{R+C}.$$

Si l'on abaisse maintenant le piston, la communication entre le cylindre et le récipient est immédiatement interrompue, et, tandis que l'air du corps de pompe est expulsé au fur et à mesure de la descente du piston, l'air du récipient conserve la pression H_1 : *donc H_1 représente la force élastique dans le récipient après le premier coup de piston.* On verra de la même manière que la pression dans le récipient, après deux coups de piston, est donnée par la formule

$$H_2 = H_1 \frac{R}{R+C} = H_0 \left(\frac{R}{R+C}\right)^2,$$

et, après n coups de piston, par la formule

$$[1] \qquad H_n = H_0 \left(\frac{R}{R+C}\right)^n.$$

Cas d'un espace nuisible. — Soit e l'espace nuisible. Remarquons d'abord que, lorsqu'on abaisse le piston dans l'un des cylindres, l'air qui se trouve emprisonné entre la base du piston et le fond du cylindre s'échappe, en soulevant la soupape, *jusqu'au moment où sa force élastique est devenue égale à la pression extérieure.* Au début, lorsque le piston est au bas de sa course, nous avons deux masses d'air : l'une occupant le volume R du récipient, à la pression initiale H_0 ; l'autre occupant le volume de l'espace nuisible, à la pression atmosphérique extérieure H. Quand on soulève le piston, ces deux masses d'air se mélangent dans le volume total $(R+C)$ et prennent une pression H_1, qui est donnée par l'équation du mélange des gaz,

$$H_1(R+C) = H_0 R + He;$$

d'où

$$[1] \qquad H_1 = H_0 \frac{R}{R+C} + H\frac{e}{R+C}.$$

Quand on abaisse le piston, la communication est immédiatement interrompue entre le cylindre et le récipient, et celui-ci reste plein d'air à la pression H_1 : *donc H_1 représente la pression de l'air du récipient après un seul coup de piston.* On aura de même, après deux coups de piston,

$$[2] \qquad H_2 = H_1 \frac{R}{R+C} + H\frac{e}{R+C},$$

et ainsi de suite, jusqu'au $(n-1)^e$ et jusqu'au n^e coups de piston

$$[n-1] \qquad H_{n-1} = H_{n-2}\frac{R}{R+C} + H\frac{e}{R+C};$$

$$[n] \qquad H_n = H_{n-1}\frac{R}{R+C} + H\frac{e}{R+C}.$$

De cette série d'équations on peut déduire la valeur de H_n en fonction de H_0 et des coefficients connus. Il suffit d'éliminer les pressions intermédiaires $H_1, H_2 \ldots H_{n-1}$, en appliquant un procédé algébrique usuel. Il consiste à multiplier les deux membres de l'équation $[n-1]$ par $\frac{R}{R+C}$, puis les deux membres de l'équation $[n-2]$ par $\left(\frac{R}{R+C}\right)^2$, et ainsi de suite jusqu'à l'équation [2], dont on multipliera les deux membres par $\left(\frac{R}{R+C}\right)^{n-2}$, et l'équation [1], dont on multipliera les deux membres par $\left(\frac{R}{R+C}\right)^{n-1}$. On obtient ainsi la suite des équations transformées :

$$[1'] \qquad H_1\left(\frac{R}{R+C}\right)^{n-1} = H_0\left(\frac{R}{R+C}\right)^n + H\frac{e}{R+C}\left(\frac{R}{R+C}\right)^{n-1},$$

$$[2'] \qquad H_2\left(\frac{R}{R+C}\right)^{n-2} = H_1\left(\frac{R}{R+C}\right)^{n-1} + H\frac{e}{R+C}\left(\frac{R}{R+C}\right)^{n-2},$$

. . . . . .

$$[n-1'] \qquad H_{n-1}\frac{R}{R+C} = H_{n-1}\left(\frac{R}{R+C}\right)^2 + H\frac{e}{R+C}\left(\frac{R}{R+C}\right),$$

$$[n'] \qquad H_n = H_{n-1}\left(\frac{R}{R+C}\right) + H\frac{e}{R+C}.$$

En ajoutant toutes ces équations membre à membre, on voit que les termes intermédiaires disparaîtront dans la somme, et qu'il restera

$$H_n = H_0\left(\frac{R}{R+C}\right)^n + H\frac{e}{R+C}\left[\left(\frac{R}{R+C}\right)^{n-1} + \left(\frac{R}{R+C}\right)^{n-2} + \ldots + \frac{R}{R+C} + 1\right],$$

ou bien, en effectuant la somme de la progression géométrique croissante renfermée entre parenthèses, et en supprimant, au deuxième terme, le facteur commun (RH),

$$[2] \qquad H_n = H_0\left(\frac{R}{R+C}\right)^n + H\frac{e}{C}\left[1 - \left(\frac{R}{R+C}\right)^n\right].$$

247. **Limite du vide.** — La machine pneumatique, si bien construite qu'elle soit, ne peut donner un vide absolu. Il arrive toujours un moment où elle cesse de fonctionner, et où la pression dans le récipient conserve une valeur minimum : on dit alors qu'on a atteint la *limite du vide*.

Les causes qui limitent nécessairement le fonctionnement de la machine sont de deux sortes : les unes sont des conséquences de la théorie même de la machine et de la loi des épuisements ; les autres sont dues aux défectuosités mécaniques de la construction.

1° *Limite théorique.* — Si l'on s'en tenait à la formule théorique [1]

$$H_n = H_0 \left(\frac{R}{R+C}\right)^n,$$

il n'y aurait pas de limite au vide. En effet, la pression au bout de n coups de piston serait une fraction de la pression initiale, aussi petite qu'on le voudrait. Il en résulterait donc que, d'une part, on n'arriverait au vide absolu que pour un nombre infini de coups de piston (pour $n = \infty$, $H_n = 0$) ; d'autre part, on pourrait s'en rapprocher autant qu'on voudrait.

Mais la formule [2], qui tient compte de l'espace nuisible, est seule conforme à la réalité pratique, et par suite seule acceptable. Or, si l'on y fait $n = \infty$ et qu'on appelle λ la pression correspondante, on a

$$\lambda = H \frac{e}{C}.$$

2° *Démonstration directe de la formule du vide.* — On peut trouver cette formule sans passer par la loi générale des épuisements. Nous avons vu, en effet, que, lorsqu'on abaisse le piston, l'air confiné dans le corps de pompe soulève la soupape du piston et s'échappe tant qu'il a une pression supérieure ou égale à la pression extérieure. Si donc la limite est atteinte, c'est-à-dire si la soupape ne fonctionne plus, c'est que la masse d'air qui se répand dans le cylindre quand le piston est au haut de sa course, a une pression λ qui s'élevait *au plus* à la valeur H, lorsque la masse d'air était réduite au volume e de l'espace nuisible. En appliquant la loi de Mariotte, on a

$$He = C\lambda, \quad \text{d'où} \quad \lambda = H.\frac{e}{C}.$$

Or, quand le piston est au haut de sa course, il y a communication entre le cylindre et le récipient : donc λ représente également la pression limite de l'air du récipient.

3° *Limite pratique.* — Dans la pratique, cette limite n'est même pas atteinte. Les meilleures machines pneumatiques de ce modèle ne peuvent pas diminuer la pression au delà de 1 ou 2 millimètres. Cela tient à ce que, outre l'espace nuisible, dont nous avons tenu compte, il existe des joints nombreux qui sont plus ou moins parfaits. Ce sont, par exemple, les contacts entre les pistons et les cylindres, la soupape à tige qui ferme la base de chaque cylindre, les soudures, les robinets, le métal lui-même, qui est quelquefois perméable à l'air. Il en résulte que, pendant qu'on enlève de l'air par le jeu du piston, il en rentre par tous ces joints. La quantité de gaz expulsée est d'abord beaucoup plus grande que la quantité d'air qui rentre ; mais la différence diminue à mesure que le vide se produit, et elle finit par devenir nulle. A ce moment les deux actions se compensent, la limite pratique du vide est atteinte, et le jeu de la machine ne sert qu'à maintenir constante la pression finale.

248. **Robinet de Babinet** ou **Robinet à double épuisement.** — Babinet ajouta à la machine ordinaire un dispositif spécial qui permet de pousser la raréfaction de l'air beaucoup plus loin que la limite normale du vide.

1° *Description.* — C'est un robinet Q placé à la bifurcation du canal qui conduit l'air du récipient aux deux corps de pompe : il est percé, dans sa masse, de plusieurs conduits qu'on utilise successivement en le tournant dans deux positions rectangulaires. Les figures 273 (I et II) en représentent la coupe verticale dans ses deux positions.

Les figures 272 (I et II) représentent, en coupe horizontale, les communications entre le robinet et les corps de pompe, qui correspondent à ces deux positions.

Dans la position (I), le robinet établit par un conduit central et par deux conduits latéraux la communication entre le récipient et les corps de pompe, de n en c et en d, et la machine fonctionne alors comme il a été dit ci-dessus. Lorsqu'elle ne fonctionne plus, c'est-à-dire lorsque les soupapes Z refusent de s'ouvrir, on tourne le robinet Q de 90 degrés et il se trouve alors dans la position (II). A partir de ce moment, les autres conduits du robinet correspondent à ceux de la plate-forme, et le corps de pompe de droite communique *seul* avec le récipient par le conduit *nmc*, tandis que celui de gauche se trouve mis en communication, par un conduit qui traverse obliquement le robinet, avec une ouverture centrale o, pratiquée à la base du corps de pompe de droite, et toujours ouverte.

2° *Fonctionnement.* — Lorsqu'on soulève alors le piston de droite, on aspire l'air du récipient ; mais lorsqu'on l'abaisse, l'air qui vient d'être aspiré est refoulé dans le corps de pompe de gauche par les orifices o et d (fig. 272) ; ce dernier est ouvert, puisque la soupape conique qui lui correspond est soulevée. Lorsque ensuite le piston de droite remonte, celui de gauche s'abaisse ; mais l'air qui est au-dessous ne retourne pas dans le corps de pompe de droite, parce que l'orifice d est maintenant fermé par la soupape conique. Le piston de droite continuant ainsi à aspirer l'air du récipient et à le refouler dans le corps de pompe de gauche, l'air s'accumule dans celui-ci, et finit

par y prendre une tension suffisante pour soulever la soupape Z du piston, ce qui était impossible avant que le robinet Q fût tourné. On voit, par suite, que la machine qui ne fonctionnait plus dans la position (I) du robinet, fonctionne de nouveau, dans la position (II.)

3° *Théorie.* — Dans la position (II) un seul des cylindres, le cylindre B par exemple, communique avec le récipient et y fait le vide, tandis que l'autre cylindre, A, communique avec le premier, et y puise l'air provenant du récipient (fig. 273). Une *nouvelle limite du vide* sera évidemment atteinte lors-

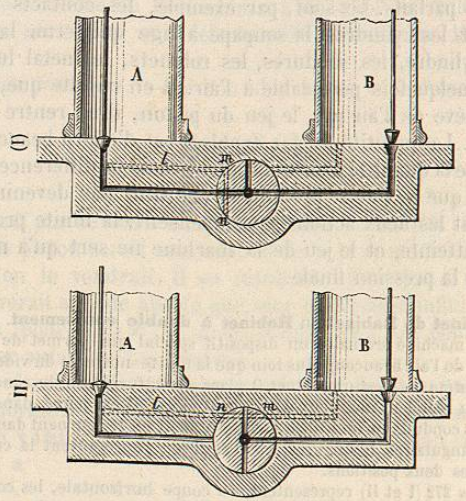

Fig. 273

que le piston cessera de nouveau de fonctionner dans le cylindre A. Supposons que cette nouvelle limite soit atteinte : à partir de ce moment, l'air refoulé dans l'espace nuisible e_1 y prend une pression au plus égale à la pression extérieure H. C'est pourquoi la soupape du piston ne se soulève plus. Soit λ la pression qu'avait cette même masse d'air lorsque ce même piston était au haut de sa course; λ est lié à la pression H par la loi de Mariotte. On a, en effet, en appelant C_1 la capacité du cylindre A,

$$\lambda C_1 = e_1 H, \qquad \text{d'où} \qquad \lambda = H \times \frac{e_1}{C_1}.$$

Or, quand le piston du cylindre A est au haut de sa course, l'autre piston est au bas de sa course dans le cylindre B, et l'espace nuisible de celui-ci communique librement, par l'intermédiaire du robinet de Babinet, avec le cylindre A ; donc la pression est également λ pour la masse d'air qui est confinée dans l'espace nuisible de B. Soit λ_1 la pression qu'avait cette même masse d'air quand le piston était au haut de sa course. On a de même, en appelant C la capacité du cylindre B,

$$\lambda e = \lambda_1 C, \qquad \text{d'où} \qquad \lambda_1 = \lambda \frac{e}{C} = H \times \frac{e}{C} \times \frac{e_1}{C_1}. \qquad [1]$$

Enfin, quand le corps de pompe B communiquait librement avec le récipient, l'air resté dans celui-ci avait la même pression que dans B; donc λ_1 représente la pression limite finale dans le récipient, c'est-à-dire la *nouvelle limite du vide.*

4° *Nouvelle formule du vide.* — Si l'on suppose $e_1 = e$ et $C_1 = C$, ce qui revient à considérer la machine comme parfaitement symétrique, et les capacités des conduites de la masse métallique comme négligeables, la formule devient

$$[2] \qquad \lambda_1 = H\left(\frac{e}{C}\right)^2.$$

La fraction qui représente la nouvelle limite du vide est donc le carré de celle qui représentait la première limite. C'est pourquoi l'on exprime quelquefois l'effet du robinet de Babinet en disant qu'il sert à faire *le vide du vide.*

Remarque. — Dans le calcul précédent, nous avons négligé l'effort nécessaire pour soulever le poids du piston et annuler la résistance de la soupape. Si l'on en tenait compte, il faudrait l'ajouter à la pression extérieure H. On aurait alors, en appelant ε la somme de ces deux pressions additionnelles,

$$[1] \qquad \lambda = (H + \varepsilon) \times \frac{e}{C} \times \frac{e_1}{C_1} \qquad \text{et} \qquad \lambda_1 = (H + \varepsilon)\left(\frac{e}{C}\right)^2. \qquad [2]$$

249. **Usages de la machine pneumatique. Expériences classiques.** — On a déjà décrit un grand nombre d'expériences qu'on fait à l'aide de la machine pneumatique. Telles sont les expériences du *tube de Newton* (81), du *marteau d'eau* (18), de la *vessie dans le vide* (187), du *crève-vessie* (191), des *hémisphères de Magdebourg* (191) et du *baroscope* (210). On peut en citer quelques autres qui sont également classiques, par exemple celles de la *fontaine dans le vide*, de la *ventouse pneumatique* et de la *pluie de mercure.*

Fontaine dans le vide.— On prend un globe de verre A (fig. 274), très allongé et muni à sa base d'une garniture à robinet, avec une tubulure qui s'élève à l'intérieur. Ayant vissé ce globe sur la platine, on y fait le vide, on ferme le robinet, puis on porte l'appareil dans un vase R contenant de l'eau. Si l'on ouvre alors le robinet, la pression atmosphérique qui s'exerce sur l'eau la fait jaillir par la tubulure, comme l'eau d'une fontaine.

Ventouse atmosphérique. — Cette expérience montre l'effet de la pression atmosphérique sur le corps humain (fig. 275). Un manchon de verre, ouvert à ses deux extrémités, étant posé sur la platine de la machine, on place la paume de la main sur ses bords, et une autre personne fait le vide. Alors, les pressions de l'atmosphère ne se faisant plus équilibre sur les deux faces de la main, celle-ci est fortement pressée sur les bords du manchon, et ce n'est qu'avec effort qu'on peut l'en retirer. De plus, l'élasticité des fluides que contiennent les organes n'étant plus contrebalancée par le poids de l'atmosphère, la paume de la main se

gonfle et le sang tend à sortir par les pores de la peau. Si l'on prolongeait l'expérience, on pourrait se faire ainsi une véritable ventouse.

Pluie de mercure. — Cette expérience démontre la perméabilité de certaines substances peu poreuses en apparence, telles que la

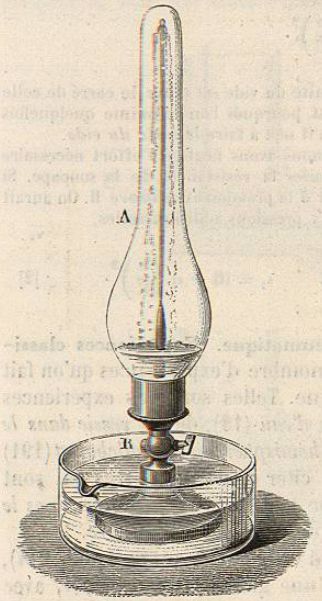

Fig. 274

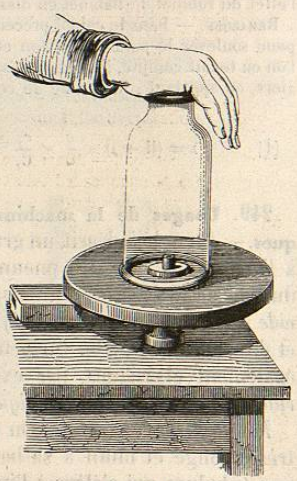

Fig. 275.

peau de chamois, le cuir épais, le bois coupé perpendiculairement aux fibres; un disque ou une rondelle de l'une de ces substances forme le fond d'un godet en cuivre, que termine à la partie supérieure un long tube à vide, analogue au tube de Newton (81). Le godet étant rempli de mercure, si l'on fait le vide au-dessous, dans le tube, le liquide traverse le fond poreux du godet, sous l'influence de la pression atmosphérique, et tombe en pluie fine dans le tube.

250. **Machine pneumatique de Bianchi.** — M. Bianchi a inventé une machine pneumatique qui présente plusieurs avantages sur la machine ordinaire. Elle est d'abord d'un maniement beaucoup plus commode, parce que le mouvement de va-et-vient du piston est produit par l'intermédiaire du mouvement rotatif d'un volant

à manivelle. Le fonctionnement du piston est rendu ainsi à la fois plus facile et plus rapide. Et comme on peut donner au cylindre de grandes dimensions, il en résulte que cette machine permet de

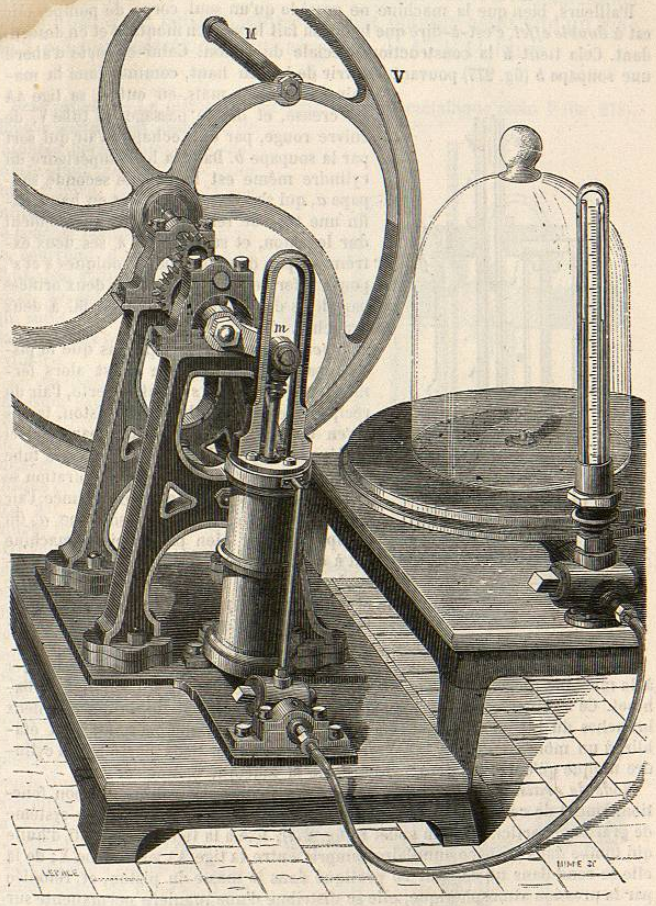

Fig. 276.

faire un vide aussi complet que la machine ordinaire dans des récipients plus grands et en un temps plus court.

Description. — La machine est entièrement construite en fonte; elle n'a