

## CHAPITRE VI

### POMPES A GAZ ET A LIQUIDES. — SIPHON.

#### I. — MACHINES SERVANT A RARÉFIER OU A COMPRIMER LES GAZ.

167. **Machine pneumatique.** — C'est à Otto de Guericke, bourgmestre de Magdebourg, que paraît due la première réalisation, en 1654, d'un instrument destiné à extraire l'air des appareils, ou d'une *pompe à gaz*. On a fait subir, à l'appareil qu'il avait imaginé, un grand nombre de modifications. Nous décrivons d'abord la machine qui est le plus fréquemment employée.

Deux corps de pompe en cristal, C et C' (fig. 142), travaillés avec soin pour que l'intérieur soit bien cylindrique, et contenant chacun un piston, communiquent par leur partie inférieure avec un seul et même conduit en fonte A, qui vient s'ouvrir en O au centre d'un plateau p, ou *platine*; la platine est formée d'un disque de cristal, dressé à l'émeri, sur lequel on applique les cloches dans lesquelles on veut faire le vide. Un pas de vis, pratiqué à l'extrémité O du conduit, permet également d'y adapter les appareils dont on veut enlever les gaz. Nous appellerons *recipient*, l'espace dans lequel la machine doit opérer la raréfaction.

Les deux corps de pompe étant semblables, il nous suffira de décrire l'un d'eux. Le piston est formé de rondelles de cuir, pressées entre deux plaques métalliques *dd'*, *ee'* (fig. 143), qu'on a serrées l'une contre l'autre, au moyen d'un pas de vis, pour forcer le cuir à s'appliquer sur la paroi intérieure du corps de pompe. La pièce métallique qui forme le noyau du piston est creusée, suivant l'axe, d'un canal qui la traverse entièrement : ce canal contient un petit disque de métal *g*, qui est maintenu faiblement appliqué sur les bords de l'ouverture *a*, par un petit ressort à boudin. Le piston est traversé par une tige métallique *hh*, qui y passe à frottement dur; cette tige porte à sa partie

inférieure un bouchon conique de métal, qui peut s'engager dans l'entrée *b* du conduit; à sa partie supérieure, cette même tige porte un arrêt *i*, qui viendra buter contre la base supérieure du corps de pompe, dès que le piston, en s'élevant, aura entraîné le bouchon conique à une petite distance au-dessous de l'ouverture *b*.

Des tiges à crémaillère T, T', articulées avec les pistons, engrènent

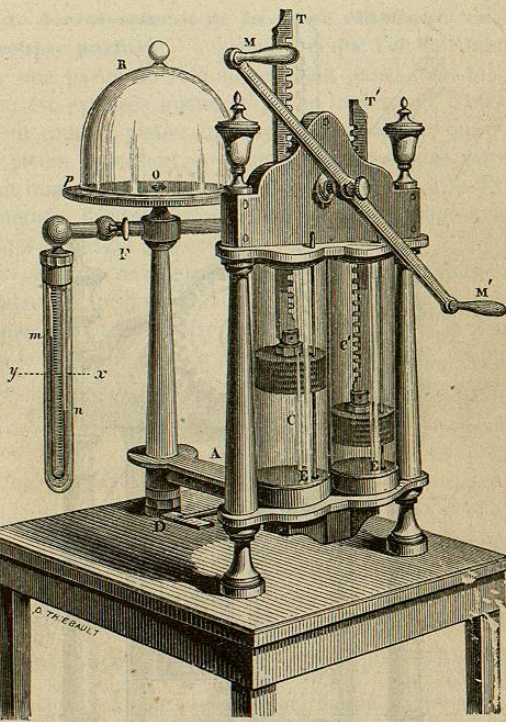


Fig. 142. — Machine pneumatique.

avec une même roue dentée, qu'on mettra en mouvement alternativement dans un sens ou dans l'autre, à l'aide de la manivelle M, M' (fig. 142) : dans chacun de ces mouvements, l'un des pistons s'abaissera pendant que l'autre sera soulevé, et réciproquement.

168. **Jeu de la machine.** — Supposons que l'un des pistons, d'abord appliqué sur le fond du corps de pompe, vienne à être soulevé (c'est le mouvement qu'indique la figure 143 pour le piston de gauche P). Le bouchon conique est soulevé un peu au-dessous de l'ouverture *b*; mais bientôt la tige vient buter, par son arrêt *i*, contre la base supé-

rieure du corps de pompe, et le piston continue seul à monter ; l'air contenu dans le récipient acquiert, en se répandant dans le corps de pompe, un volume toujours croissant et par suite une force élastique décroissante. Pendant tout ce temps, le disque  $g$  reste appliqué sur l'ouverture  $a$ , puisqu'il supporte en dessus la pression atmosphérique, qui est supérieure à la pression actuelle de l'air dans le récipient. —

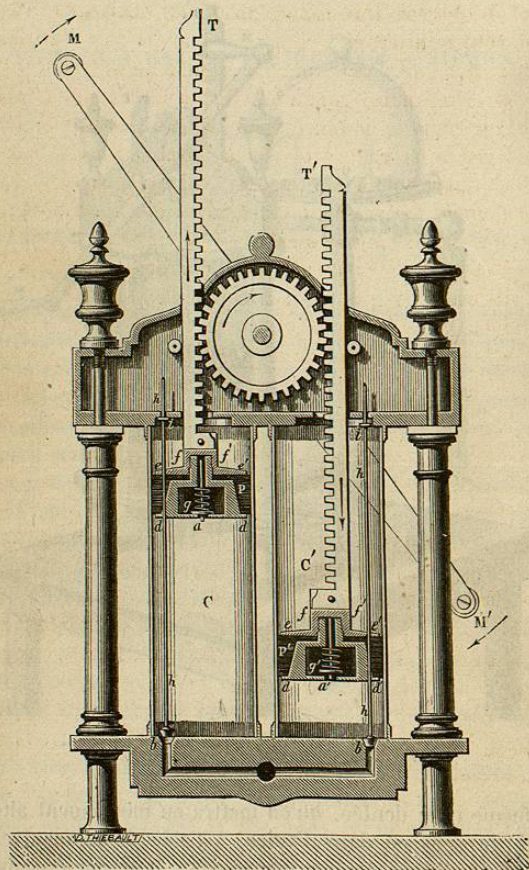


Fig. 145. — Coupe verticale des corps de pompe et des pistons.

Supposons maintenant que le piston, arrivé au haut de sa course, soit abaissé : la tige  $hh$  sera entraînée, et le cône inférieur viendra presque immédiatement s'appliquer dans l'ouverture  $b$  et interrompre la communication entre le récipient et le corps de pompe : l'air en-

fermé dans le corps de pompe, et comprimé par le piston, soulèvera le disque  $g$  quand sa force élastique sera devenue supérieure à la pression atmosphérique, et il continuera à s'échapper par l'ouverture  $a$ , jusqu'à ce que le piston soit au bas de sa course (c'est le mouvement que suppose la figure pour le piston de droite  $P$ ). — Les mêmes phénomènes se reproduiront chaque fois qu'on fera successivement monter et descendre l'un des pistons, c'est-à-dire à chaque *coup de piston*.

**169. Loi de décroissement de la force élastique, en supposant la machine parfaite.** — Chaque fois que l'on fait monter l'un des pistons, une partie de l'air du récipient passe dans le corps de pompe, et en est expulsée quand le piston redescend : on n'enlève donc, à chaque coup de piston, qu'une fraction de l'air qui était resté au coup de piston précédent. — Donc, *même avec une machine parfaite*, il serait impossible d'enlever tout l'air du récipient. — Examinons d'ailleurs comment décroît la force élastique de l'air dans le récipient, après les coups de piston successifs.

Soit  $V$  le volume du récipient et des conduits,  $v$  le volume du corps de pompe quand le piston est au haut de sa course,  $H$  la pression atmosphérique. Quand on soulève pour la première fois le piston, l'air, qui occupait le volume  $V$  sous la pression  $H$ , occupe le volume  $V + v$  ; si donc on désigne par  $h_1$  sa pression à ce moment, elle doit satisfaire, d'après la loi de Mariotte, à la relation

$$\frac{h_1}{H} = \frac{V}{V + v}, \quad \text{d'où} \quad h_1 = H \frac{V}{V + v}.$$

C'est-à-dire que, pour obtenir la force élastique après le premier coup de piston, il suffit de multiplier la force élastique que possédait l'air avant ce coup de piston, par la fraction  $\frac{V}{V + v}$ . De même, pour obtenir la pression  $h_2$  après le deuxième coup de piston, il suffit de multiplier cette valeur de  $h_1$  par  $\frac{V}{V + v}$ , ce qui donne  $H \left(\frac{V}{V + v}\right)^2$ , et ainsi de suite. Donc, en général, en désignant par  $h_n$  la force élastique de l'air après  $n$  coups de piston, on a

$$(1) \quad h_n = H \left(\frac{V}{V + v}\right)^n.$$

La fraction  $\frac{V}{V + v}$  étant plus petite que l'unité, les valeurs successives de  $h_n$  vont en décroissant à mesure que  $n$  augmente, et en faisant  $n$  suffisamment grand, on peut donner à  $h_n$  une valeur aussi petite que l'on voudra. — Donc, en supposant la machine parfaite, il y aurait toujours avantage à donner un plus grand nombre de coups de

piston, et la force élastique, sans devenir jamais *nulle*, pourrait devenir *aussi petite qu'on voudrait*.

**170. Influence de l'espace nuisible.** — Quelque soin que l'on ait apporté dans l'ajustement des pistons et des cônes qui bouchent les conduits de la machine, il reste inévitablement, sous les pistons, quand ils sont appliqués sur le fond de leurs corps de pompe, de petites cavités qu'on désigne sous le nom d'*espace nuisible*.

Or, admettons, pour un instant, qu'il soit possible de réduire la force élastique à une valeur telle, que le gaz répandu dans le corps de pompe, au moment où l'un des pistons est en haut de sa course, puisse être ensuite réduit au volume de l'espace nuisible sans acquérir une force élastique supérieure à la pression atmosphérique : il est clair que, s'il en était ainsi, la descente du piston ne déterminerait plus l'ouverture de la soupape intérieure *g*, et l'air cesserait de s'échapper dans l'atmosphère. Donc, pour toute machine présentant un espace nuisible, il y a une *force élastique minimum*, au-dessous de laquelle il serait impossible de descendre. — Pour en déterminer la valeur, désignons par *u* le volume de l'espace nuisible; l'air qui occuperait le volume *v* du corps de pompe sous la force élastique minimum *f* atteindrait une force élastique égale à la pression atmosphérique *H* lorsqu'il serait réduit au volume *u*; on aurait donc, d'après la loi de Mariotte,

$$\frac{f}{H} = \frac{u}{v}, \quad \text{d'où} \quad f = H \frac{u}{v},$$

expression qui est d'autant plus petite que le rapport du volume de l'espace nuisible au volume du corps de pompe est moindre.

La théorie montre que cette limite ne peut même jamais être atteinte. Lorsqu'on tient compte de cette imperfection de la machine, la loi de décroissement de la force élastique après les coups de piston successifs est représentée par une expression plus compliquée que l'expression (1), et la discussion montre que la pression ne prend la valeur *f* que pour un nombre infini de coups de piston. — Cependant, si la machine ne présentait aucun autre défaut, cette même expression montre que, sans atteindre jamais la limite, on en approcherait de plus en plus, à mesure que le nombre des coups de piston deviendrait plus grand (\*).

(\*) *Perfectionnement de Babinet.* — Pour reculer encore davantage la limite de raréfaction, on adapte à un grand nombre de machines une pièce particulière, dont l'idée est due à Babinet; c'est un robinet placé au point où les conduits des deux corps de pompe se réunissent, et dont on a indiqué (fig. 144 et 145) la section perpendiculaire à l'axe : la figure montre les diverses voies qui y sont pratiquées, soit dans le plan même de la figure, soit en arrière de ce plan, et, en outre, l'ouverture d'une voie longitudinale, partant du point *D* et se continuant en arrière avec le conduit de la platine. Quand ce robinet est dans la position indiquée par la figure 144, tout se passe comme s'il n'existait pas. — Lorsqu'on est arrivé assez près de la limite de raréfaction pour que les soupapes des pistons n'expulsent que des quantités d'air inap-

**171. Influence des rentrées d'air.** — Dans le plus grand nombre des machines, l'imperfection la plus grave consiste dans l'existence de petits interstices livrant passage à l'air, particulièrement autour des soupapes intérieures des pistons. L'air extérieur pénètre par ces interstices, avec une vitesse d'autant plus grande que la pression intérieure est plus faible : on conçoit donc qu'il arrive un moment où la quantité d'air qui rentre dans la machine devient égale à la quantité qu'on en expulse, quelle que soit la rapidité avec laquelle on fasse succéder les coups de piston. Il n'y a plus alors *aucun avantage à continuer de faire fonctionner la machine*. — En outre, si l'on veut arrêter l'opération et conserver le vide dans le récipient, il est nécessaire de fermer la communication entre le récipient et les corps de pompe. C'est ce que permet de faire la *clef*, comme nous le verrons plus loin (174).

**172. Avantages de l'emploi de deux corps de pompe.** — Dans une machine à un seul corps de pompe, on aurait à vaincre, chaque fois qu'on soulèverait le piston, une résistance égale à la différence des pressions exercées, d'une part sur la face supérieure du piston par l'atmosphère, d'autre part sur la face inférieure par le gaz raréfié : le second terme de cette différence devenant rapidement assez faible, l'opération deviendrait bientôt très pénible. — Dans la disposition actuelle, les deux pistons *P* et *P'* supportent sur leurs faces supérieures la pression de l'atmosphère : pour les faire mouvoir en sens contraire, on n'a donc à vaincre que la différence des pressions exercées sur leurs faces inférieures, laquelle résulte à chaque instant

préciables, on tourne ce robinet d'un quart de circonférence, de manière à l'amener dans la position de la figure 145 : la base du corps de pompe *C* se trouve mise en communication permanente avec le conduit qui aboutit au corps de pompe *C'*, par le petit canal accessoire *rst* qui est alors ouvert; on voit en outre que, des deux corps de pompe, *C* communique seul avec le récipient. Dès lors, quand on élève le piston de *C*, l'air du récipient passe dans ce corps de pompe, et quand on l'abaisse, une fraction de cet air est chassée en *C'*; quand on abaisse le piston de *C'*, cette fraction y reste en-

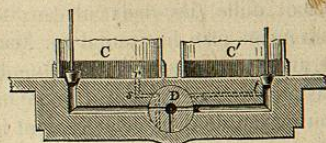


Fig. 144.

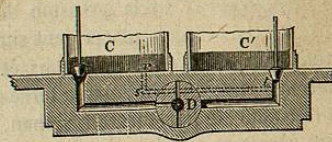


Fig. 145.

fermée. Il en est de même aux coups de piston suivants, en sorte que le gaz qui est ainsi refoulé en *C'* acquiert bientôt, dans l'espace nuisible, une force élastique suffisante pour soulever la soupape. La machine continue donc de fonctionner quelque temps : mais bientôt, le disque ne se soulevant plus qu'après un nombre de coups de piston de plus en plus considérable, on cesse encore de faire des progrès sensibles. — Avec les machines bien construites, on peut amener l'air à n'avoir plus qu'une force élastique d'un ou deux millimètres de mercure.

de la différence des forces élastiques de l'air dans les deux corps de pompe (\*).

Enfin, l'effort de l'opérateur, s'exerçant sur les poignées M, M' (fig. 142), développe sur la tige, au point où celle-ci engrène avec la roue dentée, une force qui a pour mesure cet effort lui-même multiplié par le rapport de la longueur du bras du levier au rayon de la roue.

Pour ces diverses raisons, on peut donner aux corps de pompe une section assez considérable, sans que la manœuvre de la machine soit trop pénible.

**175. Manomètre de la machine.** — Les machines pneumatiques portent toujours un manomètre destiné à faire connaître, à chaque instant, la force élastique de l'air qui reste dans le récipient. Le plus ordinairement, c'est un tube de verre à deux branches M, N (fig. 146) dont l'une M est fermée, et qu'on nomme *baromètre tronqué*. Le tube est fixé sur une plaque de métal, et contenu dans une cloche de verre ou *éprouvette*, qui est mise en communication avec le conduit par une douille métallique qui est fixée, soit à sa partie inférieure (fig. 146), soit à sa partie supérieure (fig. 142).

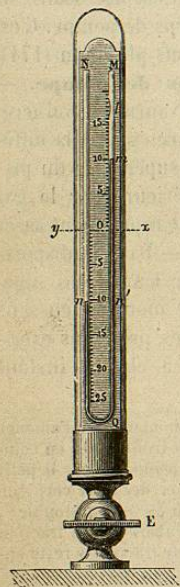


Fig. 146.

On a procédé, pour l'introduction du mercure dans le tube, comme pour la construction d'un baromètre à siphon; mais, les branches n'ayant guère que deux décimètres environ, quand la pression de l'atmosphère s'exerce dans la branche ouverte, le liquide reste appliqué contre le sommet de la branche fermée. — Quand la pression dans le récipient de la machine est devenue suffisamment petite, le mercure commence à descendre dans la branche MQ et à s'élever dans l'autre; si la pression devenait nulle, les deux niveaux se placeraient sur un même plan horizontal *xy*. Nous avons vu qu'il n'en peut jamais être ainsi : on mesure la colonne de mercure *mn'*, qui exprime la force élastique de l'air restant, comme on le fait pour le baromètre à siphon, au moyen de deux échelles dont le zéro commun est dans le plan *xy* (\*\*).

(\*) Quand on a déjà donné un grand nombre de coups de piston, si l'on considère le moment où l'un des pistons arrive vers le bas de sa course, on voit que la différence de ces pressions devient encore presque égale à une atmosphère, mais le chemin qui reste à parcourir est très petit, et, par suite, le travail à développer (21) est très peu considérable.

(\*\*) La figure montre, sur la branche fermée, un étranglement *l*, près de son extrémité : il est destiné à ralentir l'ascension du mercure, au moment où on laisse rentrer

**174. Clef de la machine.** — Nous avons vu que, lorsqu'on veut maintenir la raréfaction sans être obligé de continuer à faire fonctionner la machine, il est nécessaire de fermer la communication entre le récipient et les corps de pompe (171). D'autre part, la pression atmosphérique tendant à faire passer entre les pistons et les corps de pompe une certaine quantité d'huile, qui pourrait obstruer les conduits, il est utile de pouvoir alors laisser rentrer l'air dans les corps de pompe. Enfin, quand l'expérience est terminée, il faut pouvoir rendre l'air au récipient. — Ces diverses opérations s'effectuent au moyen de la *clef*.

La clef est un robinet D, placé sur le conduit A de la figure 142; on y a pratiqué d'abord la voie ordinaire, qui établit la communication

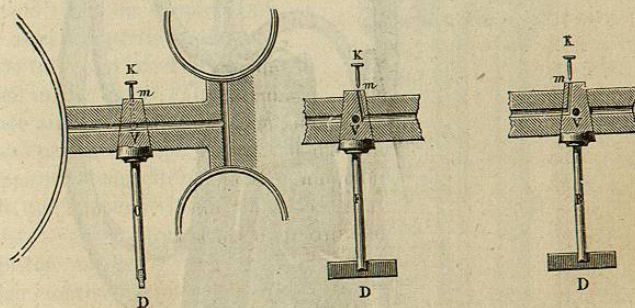


Fig. 147.

Fig. 148.

Fig. 149.

entre le récipient et les corps de pompe quand le robinet est ouvert (fig. 147). Il présente, en outre, un petit conduit longitudinal *m*, courbé à angle droit, comme le montrent les figures 148 et 149, et destiné à servir seulement quand le robinet est fermé : on peut alors, en enlevant la cheville K, laisser rentrer l'air, soit dans les corps de pompe (fig. 148), soit dans le récipient (fig. 149), selon la façon dont le robinet est tourné. — Pour amener la clef dans l'une de ces trois positions, l'expérimentateur la fait tourner de manière à lire, en dessus, l'une des trois lettres suivantes, gravées sur le métal :

- O — Conduit ouvert.
- F — Conduit fermé (on peut rendre l'air dans les corps de pompe).
- R — Rentrée de l'air dans le récipient.

Dans les machines qui sont munies du robinet de Babinet, cette pièce est, en général, disposée de manière à faire fonction de clef.

Air dans les conduits; sans cette précaution, le sommet de la colonne de mercure viendrait frapper sur le verre un coup sec, qui pourrait en déterminer la rupture.

\* 175. **Machine pneumatique de Bianchi.** — La machine pneumatique de Bianchi (fig. 150) est une pompe à double effet; bien qu'un seul cylindre, elle offre les avantages des machines à deux corps de pompe. Le piston est mis en mouvement par la rotation du volant V.

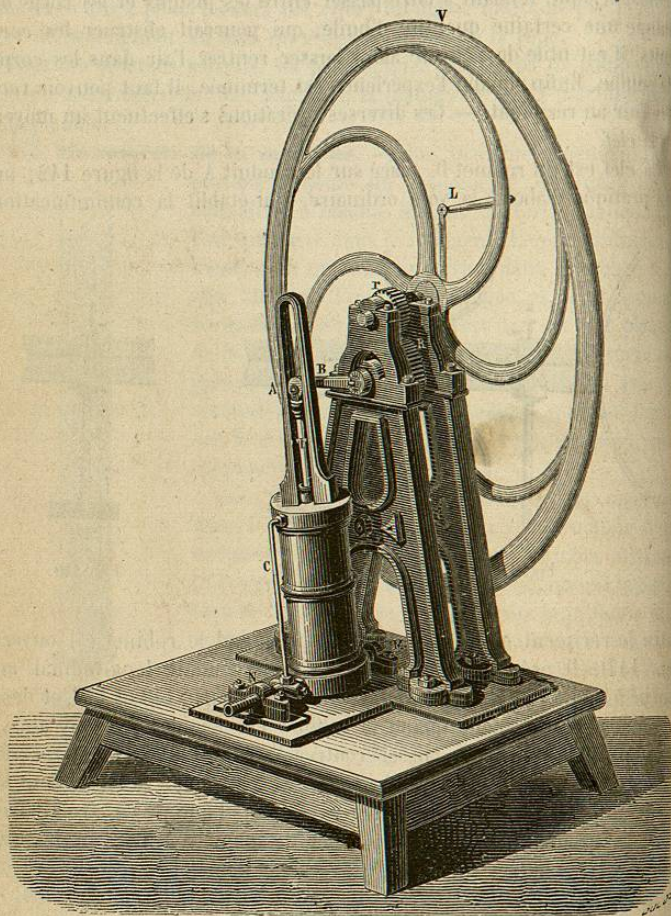


Fig. 150. — Machine pneumatique de Bianchi.

qui se transmet aux roues dentées *r* et *R*, et imprime un mouvement de va-et-vient à la tige *T*, par l'intermédiaire de la manivelle *B*; en même temps, le cylindre oscille autour de l'axe *MN*, et accompagne l'extrémité de la tige *B*, qui est maintenue entre des glissières. — Voici comment fonctionne cette machine.

Le cylindre est mis en communication avec les appareils dans lesquels on veut raréfier l'air, au moyen d'un tube de caoutchouc, assez épais pour qu'il ne s'écrase pas lorsqu'on y fait le vide; on adapte ce tube sur l'extrémité *N* du canal qui est pratiquée dans l'axe *MN*. — L'air du récipient arrive dans le cylindre, soit par *a*, soit par *a'* (fig. 151), et chacune de ces ouvertures est alternativement bouchée par l'un ou l'autre des cônes qui terminent la tige glissante *aa'*; enfin, on voit en *b* et *b'* deux soupapes semblables aux soupapes intérieures des pistons de la machine ordinaire. — La figure 151 suppose que le piston descend: l'air du récipient arrive alors à la partie supérieure par le tube *C* et par l'ouverture *a'*; en même temps, l'air qui se trouve au-dessous du piston est chassé par la soupape *b* et s'échappe par la capacité intérieure de la tige *T*, comme l'indique la flèche. — Au contraire, quand le piston monte, *a'* se ferme, et l'air emprisonné au-dessus du piston est chassé par la soupape *b'*; en même temps, l'air du récipient arrive à la partie inférieure par l'ouverture *a*, tandis que la soupape *b* est maintenue fermée par la pression atmosphérique. — On voit donc que les deux parties du cylindre séparées par le piston fonctionnent, simultanément et en sens inverse, comme le feraient les deux corps de pompe d'une machine pneumatique ordinaire.

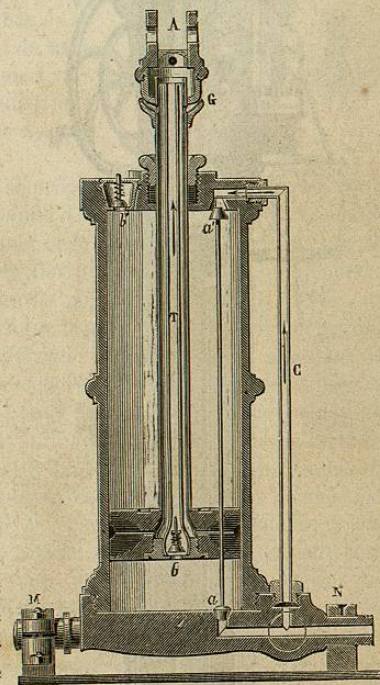


Fig. 151.

Cette machine présente également l'avantage des machines à deux corps de pompe, quant à la grandeur de l'effort à vaincre, puisque la pression de l'atmosphère ne s'exerce sur aucune des deux faces du piston. — Le cylindre étant en fonte, on peut lui donner des dimensions aussi grandes qu'on le désire. — La machine peut donc faire rapidement le vide dans de vastes appareils.

176. **Machine pneumatique à mercure.** — La machine pneumatique à mercure, construite d'abord par M. Geissler, et perfectionnée en France par M. Alvergniat, est destinée à obtenir une raréfaction

tion beaucoup plus parfaite que ne peut le faire la machine ordinaire.

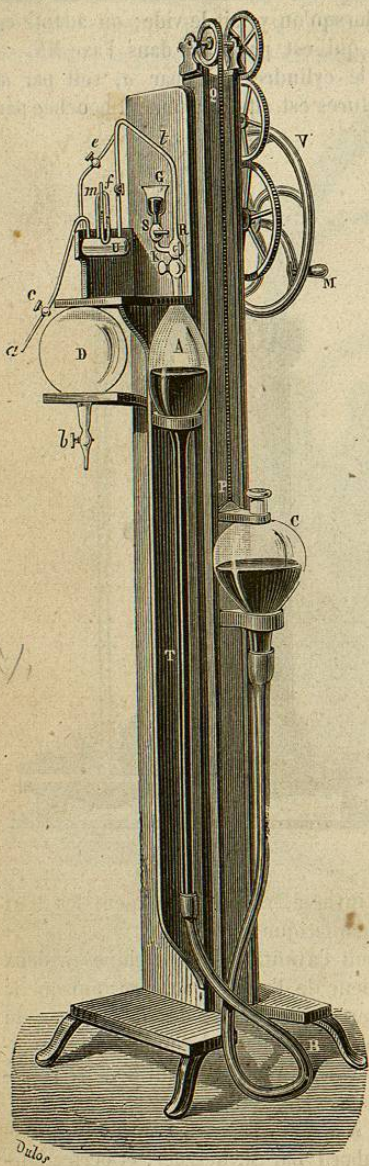


Fig. 152. — Machine pneumatique à mercure.

Le tube T (fig. 152), renflé à sa partie supérieure A, doit fonctionner comme une sorte de tube barométrique, dont la chambre sera représentée par la capacité A; il est mis en communication, par un gros tube de caoutchouc B, avec une cuvette C s'ouvrant à l'air libre. Ce tube T occupe une position fixe sur la planche verticale qui le supporte; la cuvette C peut, au contraire, être amenée volonté, au moyen de la chaîne métallique PQ et des roues dentées qui commande le volant V, soit à la partie supérieure, soit à la partie inférieure de l'appareil. Le robinet R est un robinet à trois voies qui occupera, pendant la manœuvre, deux positions différentes,  $R_1$  et  $R_2$  (fig. 155) : lorsqu'il est dans la position  $R_2$ , il établit la communication entre la capacité A et le système de tubes qui est à la partie supérieure; dans la position  $R_1$ , il intercepte cette communication, mais il fait communiquer la capacité A avec le tube latéral, qui se termine par une petite cuvette pleine de mercure G.

Pour mettre en jeu la machine, on commence par chasser l'air que contient le tube barométrique. Pour cela, on met le robinet R dans la position  $R_2$ , et on amène la cuvette C à la partie supérieure de sa course : le mercure s'écoulant de C vers A comprime cet air, et, quand la masse liquide est arrivée à

l'équilibre, le gaz compris entre la surface du mercure et le robinet S est à une pression supérieure à la pression atmosphérique (\*). On ouvre alors doucement le robinet S, de manière à livrer passage à cet air, qui s'échappe en traversant la cuvette G; le mercure du système CBA arrive ainsi à remplir complètement la capacité A, jusqu'au robinet S. On ferme S, et, en faisant descendre la cuvette C jusqu'au bas de sa course, on détermine l'écoulement du mercure en sens inverse, c'est-à-dire de A vers C, ce qui produit un vide barométrique dans toute la partie supérieure de A, et la machine est prête à fonctionner.

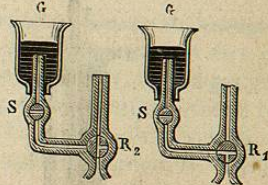


Fig. 155.

Les appareils dans lesquels on se propose de raréfier l'air avec cette machine ont été, en général, soumis d'abord à l'action de la machine pneumatique ordinaire; on les met ensuite en communication avec le tube a (\*\*). La manœuvre consiste alors dans la série suivante d'opérations. — On met le robinet R dans la position  $R_2$  (fig. 155), et, en ouvrant les robinets f et c, on détermine le passage d'une partie du gaz des appareils dans la chambre barométrique : l'arrivée de ce gaz dans la chambre a pour effet de faire descendre le niveau du mercure dans le tube barométrique et d'accroître ainsi l'espace dans lequel le gaz est aspiré. Lorsque le mercure a pris un nouvel équilibre dans le système de tubes ABC, on remet le robinet R dans la position  $R_1$ , on ramène la cuvette C à la partie supérieure de sa course, pour comprimer le gaz qui s'est rendu dans la capacité A, et enfin on fait échapper ce gaz dans l'atmosphère en ouvrant le robinet S. — En répétant cette manœuvre, on fait passer, à chaque fois, une certaine partie du gaz des appareils dans la machine, et de la machine dans l'atmosphère. On arrive ainsi à obtenir une pression tellement faible, que le baromètre tronqué m n'indique plus qu'une différence inappréciable entre les niveaux du mercure dans ces deux branches (\*\*\*) .

(\*) Le robinet K, qui est représenté sur la figure 152 entre la capacité A et le robinet R, est ouvert d'une manière permanente pendant la manœuvre; il sert à fermer la capacité A, lorsque la machine ayant fonctionné pendant un certain temps, on veut enlever le robinet R pour en renouveler le graissage, sans laisser rentrer de l'air humide dans l'appareil.

(\*\*) L'emploi préalable de la machine pneumatique ordinaire n'est pas indispensable; il est seulement destiné à rendre l'opération plus rapide, en mettant, dès le commencement, la machine à mercure en communication avec un espace où le gaz est déjà raréfié.

(\*\*\*) Le réservoir U, interposé entre la machine et les appareils, contient de l'acide sulfurique concentré, pour dessécher les gaz qui pénètrent dans la machine, de manière qu'elle reste toujours parfaitement sèche. — Tous les robinets sont en verre, et travaillés d'une manière assez parfaite pour tenir indéfiniment le vide, à la condi-