qu'un seul cylindre, qui peut osciller sur un axe horizontal fixé à sa base (fig. 276). Sur un bâti de fonte est monté un arbre horizontal, avec un volant très lourd V, qu'on fait tourner à l'aide d'une manivelle M. A ce même arbre est fixée une manivelle *m* qui s'articule à la tête de la tige du piston. Par suite, à chaque révolution complète du volant, le cylindre fait deux oscillations sur son axe.

D'ailleurs, bien que la machine ne possède qu'un seul corps de pompe, elle est *à double effet*, c'est-à-dire que le piston fait le vide en montant et en descendant. Cela tient à la construction spéciale du piston. Celui-ci porte d'abord une soupape *b* (fig. 277) pouvant s'ouvrir de bas en haut, comme dans la machine ordinaire; mais, en outre, sa tige AA est creuse, et donne passage au tube V, de cuivre rouge, par où s'échappe l'air qui sort par la soupape *b*. Dans la base supérieure du cylindre même est logée une seconde soupape *a*, qui s'ouvre aussi de bas en haut. Enfin une tige de fer D traverse à frottement dur le piston, et se termine à ses deux extrémités par deux bouchons coniques *s* et *s'*, pouvant fermer tour à tour les deux orifices parallèles d'un tube d'aspiration BC à deux branches.

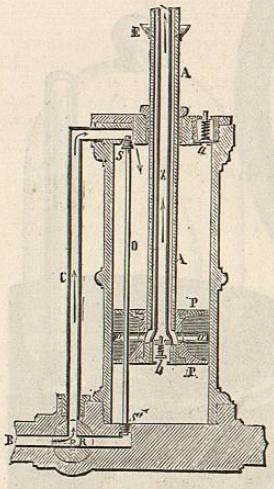

Fig. 277.

Fonctionnement. — Supposons que le piston descende. La soupape *s'* est alors fermée, et, la soupape *s* étant ouverte, l'air du récipient se rend au-dessus du piston, tandis qu'en dessous l'air comprimé par celui-ci soulève la soupape *b* et se dégage par le tube X. Quand le piston remonte, l'aspiration se fait par *s'*, et, la soupape *b* étant fermée, l'air comprimé se dégage par la soupape *a*. On comprend donc bien pourquoi la machine est à double effet bien qu'ayant un seul cylindre : c'est que les deux régions inférieure et supérieure, séparées par le piston, fonctionnent tour à tour comme les deux cylindres d'une machine ordinaire.

Robinet à double épuisement. — On comprend de même qu'on puisse adapter à la machine un robinet à double épuisement R, semblable au robinet de Babinet. Ce robinet est disposé en R (fig. 277) au point de jonction des deux branches du tube d'aspiration. En le tournant convenablement, on peut établir, à un moment donné, la même relation entre les deux portions du cylindre unique qu'entre les deux cylindres de la machine ordinaire.

Mode de graissage particulier. — Une des principales raisons du bon fonctionnement de cette machine, c'est qu'elle est, en outre, munie d'un système de graissage particulier : un godet E (fig. 277), fixé à la tige, est rempli d'huile qui tombe dans l'espace annulaire compris entre la tige AA et le tube X; de là elle se rend dans un conduit *oo* pratiqué dans la masse du piston, et, refoulée par la pression atmosphérique, elle se distribue d'une manière permanente sur le pourtour du piston.

251. **Machine pneumatique de Deleuil.** — *Principe.* — C'est aussi une machine rotative, à un seul corps de pompe (fig. 279) et à double effet, comme la précédente; mais elle présente ce caractère particulier, que son piston glisse sans frottement, et sans

addition d'huile, dans le cylindre, dont il ne touche pas les parois. La construction de cette curieuse machine est fondée sur ce fait que *les gaz circulent très difficilement à travers les conduits capillaires, surtout si ceux-ci sont munis de dilatations et d'étranglements alternatifs.* Avec cette machine on peut obtenir assez vite un vide de 2 à 3 millimètres dans un récipient de 13 à 14 litres.

Description. — Le piston est un long cylindre métallique plein P (fig. 278), dont la surface est sillonnée de rainures horizontales. Son diamètre étant plus petit que celui du cylindre (d'environ $\frac{1}{50}$ de millim.), il peut y glisser sans le boucher complètement; mais le bourrelet d'air qui se loge dans les rainures forme une sorte de cloison compressible qui suffit pour séparer les gaz dans les deux compartiments du cylindre.

Le mouvement est transmis au piston par une tige métallique qui traverse les deux fonds du cylindre. Le récipient communique alternativement avec chaque compartiment du cylindre par l'intermédiaire d'un double tube recourbé, dont les extrémités débouchent en S et en S'. Les orifices sont successivement fermés par deux bouchons coniques que porte la tige TT, laquelle traverse à frottement le piston et est entraînée dans son mouvement. Enfin deux ouvertures à soupape A, A' mettent chaque compartiment en communication avec l'atmosphère, par l'intermédiaire d'un double tube abducteur dont les extrémités se réunissent en R. La figure 279 donne une vue d'ensemble de la machine.

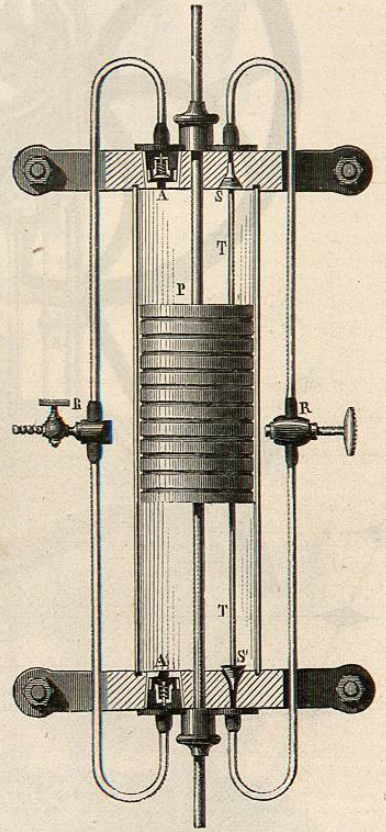

Fig. 278.

Le cylindre n'est pas *oscillant*, comme celui de Bianchi, il est *fixe :* il a donc fallu employer un dispositif spécial pour communiquer au piston, par le mouvement rotatif du volant, un mouvement rectiligne alternatif. M. Deleuil a réalisé cette transformation de mouvements à l'aide d'un *engrenage de la Hire.* Cet organe (fig. 280) se compose d'une pièce de métal, à laquelle est articulée la tige

du piston, et qui est fixée en M à la circonférence d'un pignon C. Celui-ci reçoit directement du volant un mouvement de rotation et est assujetti à engrener avec la denture intérieure d'une roue fixe A, de diamètre double. On démontre

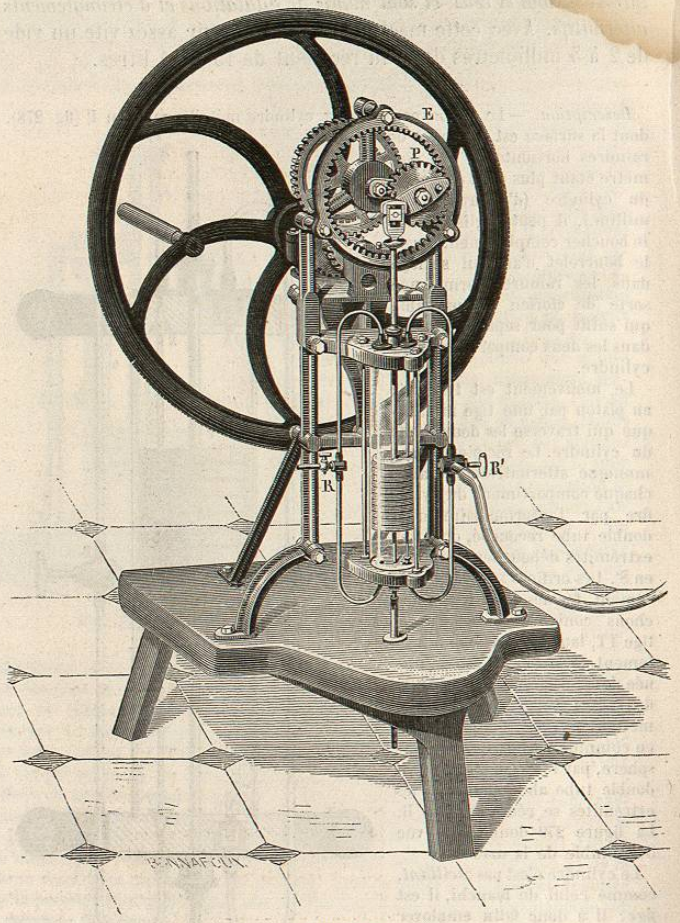

Fig. 279

géométriquement que, dans ces conditions, *la tige du piston se meut suivant un diamètre de la roue dentée* A.

252. **Pompe pneumatique de E. Carré.** — C'est une machine pneumatique à un seul corps de pompe et à simple effet. Elle présente ce triple caractère spécial : 1° de réaliser d'emblée le vide qu'on obtient d'ordinaire à l'aide

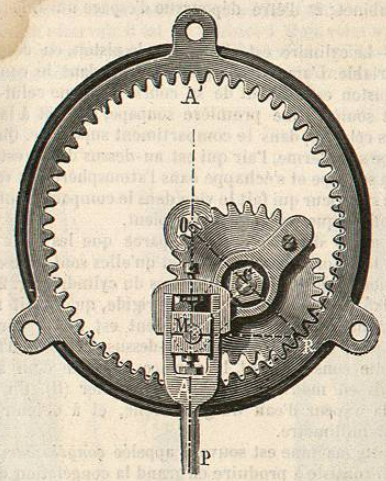

Fig. 280.

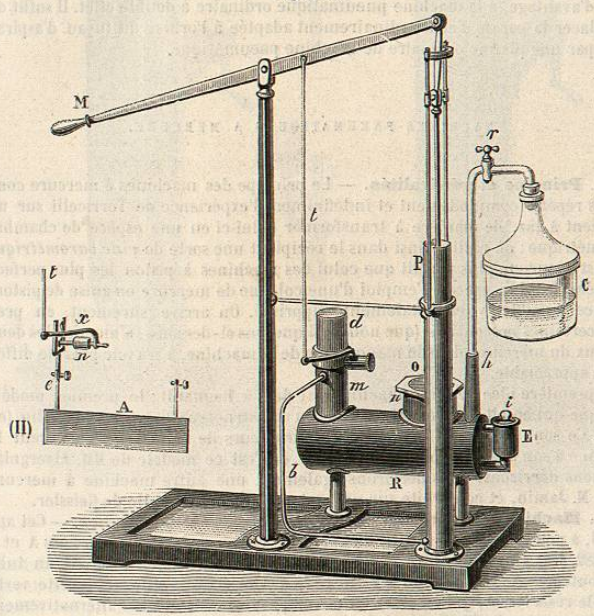

Fig. 281.

du robinet de Babinet; 2° d'être dépourvue d'espace nuisible; 3° de réaliser *un vide sec.*

Description. — Le cylindre est séparé, par le piston, en deux compartiments de grandeur variable. L'air du récipient arrive dans le compartiment inférieur quand le piston est au haut de sa course. Dès que celui-ci s'abaisse, l'air est comprimé et soulève une première soupape, qui est à la base du piston, et passe à travers celui-ci, dans le compartiment supérieur. Quand le piston se relève, sa soupape se referme, l'air qui est au-dessus de lui est comprimé, soulève une seconde soupape et s'échappe dans l'atmosphère. On voit donc que c'est le compartiment supérieur qui fait le vide dans le compartiment inférieur, tandis que celui-ci communique seul avec le récipient.

De plus, il n'y a pas d'espace nuisible, parce que les deux soupapes dépassent légèrement leurs orifices respectifs, et qu'elles sont nécessairement soulevées par la pression du piston entre les bases du cylindre (fig. 281).

Le piston est fixé à l'extrémité d'une tige rigide, qu'on fait mouvoir à l'aide d'un balancier à manette. L'air du récipient est aspiré par l'intermédiaire d'un tube *hr*. Il passe dans un vase R, au-dessus d'un bain d'acide sulfurique, dont on renouvelle constamment la surface, à l'aide d'un agitateur *e*A, qui est également mis en mouvement par le balancier (II). On parvient ainsi à absorber toute la vapeur d'eau du gaz raréfié, et à obtenir rapidement un vide sec à 1 demi-millimètre.

Remarque. — Cette machine est souvent appelée *congélateur*, à cause de son usage spécial, qui consiste à produire en grand la congélation de l'eau par ébullition dans le vide sec; mais elle peut être substituée dans tous les cas, avec beaucoup d'avantage, à la machine pneumatique ordinaire à double effet. Il suffit de remplacer la carafe d'eau, ordinairement adaptée à l'orifice du tuyau d'aspiration, par une platine ordinaire de machine pneumatique.

MACHINES PNEUMATIQUES A MERCURE.

253. **Principe et généralités.** — Le principe des machines à mercure consiste à répéter commodément et indéfiniment l'expérience de Torricelli sur un récipient à gaz, de manière à transformer celui-ci en une espèce de chambre barométrique : on réalise ainsi dans le récipient une sorte de *vide barométrique* qui est beaucoup plus parfait que celui des machines à piston les plus perfectionnées. De plus, grâce à l'emploi d'une colonne de mercure en guise de piston, l'espace nuisible y est totalement supprimé. On arrive sûrement, en prenant certaines précautions (que nous indiquerons ci-dessous), à amener les deux niveaux du mercure, dans le manomètre de la machine, à n'avoir plus de différence appréciable.

La première idée de cette machine est due à Regnault; le premier modèle pratique qui en ait été réalisé est dû au constructeur Geissler de Berlin (en 1857). Ce sont les frères Alvergniat, constructeurs de Paris, qui amenèrent la machine à son degré de perfection actuel, et c'est ce modèle de MM. Alvergniat que nous décrirons. Nous décrirons également une autre machine à mercure due à M. Jamin, et construite sur un tout autre type que celle de Geissler.

254. **Machine d'Alvergniat** (modèle primitif). — 1° *Description.* — Cet appareil, à peu près tout construit en verre, ce compose de deux réservoirs A et B (fig. 282, I et II) reliés entre eux par un tube barométrique T et par un tube de caoutchouc C. Le réservoir B et le tube T sont fixés à une planchette verticale; le réservoir A, qui est libre et ouvert, s'élève et s'abaisse alternativement avec une course de 1m,12. Ce déplacement se produit au moyen d'un long ruban de fil qui, attaché par un bout au réservoir A, passe sur une poulie *a* et de la

vient s'enrouler sur une seconde poulie *b*, qu'on fait tourner à l'aide d'une manivelle. Au-dessus du réservoir B est un robinet à trois voies *n*, duquel part un tube *d* qui sert à l'aspiration, et sur la gauche est un robinet simple *m*, qui établit la communication avec un réservoir à mercure *v* et avec l'atmosphère

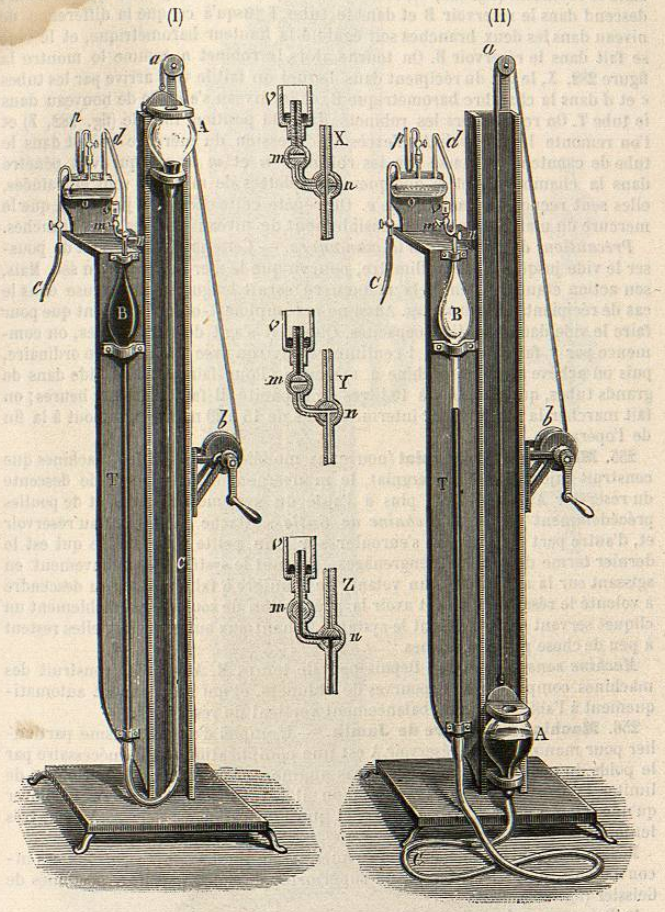

Fig. 282.

Le tube d'aspiration *d* n'est pas directement en communication avec le récipient dans leque on veut faire le vide; il se rend d'abord à un réservoir *o* en partie rempli d'acide sulfurique destiné à dessécher les gaz qui arrivent dans l'appareil. C'est ensuite un tube de caoutchouc *e* qui établit la communication avec le récipient. Enfin, sur le réservoir *o* est un petit manomètre à mercure *p*.

2° *Fonctionnement.* — Le réservoir A étant au haut de sa course (fig. 282, I), e robinet *m* ouvert et le robinet *n* tourné comme on le voit en Z, le tuyau de caoutchouc C, le tube T, le réservoir B et le tube qui est au-dessus sont remplis de mercure jusqu'en *v*; c'est ce qui a lieu dans la figure 282, I. Fermant alors le robinet *m* (fig. 282, Y), et abaissant le réservoir A (fig. 282, II), le mercure descend dans le réservoir B et dans le tube T jusqu'à ce que la différence de niveau dans les deux branches soit égale à la hauteur barométrique, et le vide se fait dans le réservoir B. On tourne alors le robinet *n* comme le montre la figure 282, X, le gaz du récipient dans lequel on fait le vide arrive par les tubes *c* et *d* dans la chambre barométrique B, et le niveau s'abaisse de nouveau dans le tube T. On remet alors les robinets dans la position initiale (fig. 282, Z) et l'on remonte le réservoir A; l'excès de pression du mercure qui est dans le tube de caoutchouc chasse par les robinets *n* et *m* le gaz qui avait pénétré dans la chambre B, et si quelques gouttelettes de mercure sont entraînées, elles sont recueillies dans le vase *v*. On répète cette opération jusqu'à ce que le mercure du manomètre *p* soit sensiblement de niveau dans les deux branches.

Précautions à prendre dans la manœuvre. — Cette machine permet de pousser le vide jusqu'à $\frac{1}{10}$ de millimètre, pourvu que le mercure soit bien sec. Mais, son action étant très lente, la manœuvre serait longue et fastidieuse dans le cas de récipients un peu vastes. Aussi ne les emploie-t-on directement que pour faire le vide dans de petites capacités. Quant il s'agit de grands vases, on commence par y faire le vide à 1 centimètre environ avec une machine ordinaire, puis on achève avec la machine à mercure. Pour faire ainsi le vide dans de grands tubes, qui ont jusqu'à 10 litres de capacité, il faut plusieurs heures; on fait marcher la machine par intermittences de 15 à 20 minutes, surtout à la fin de l'opération.

255. **Machine d'Alvergniat** (nouveaux modèles). — Dans les machines que construit aujourd'hui M. Alvergniat, le mouvement d'ascension et de descente du réservoir A ne s'obtient plus à l'aide du système de rubans et de poulies précédemment décrit. Une *chaine de Galle* s'attache d'une part au réservoir et, d'autre part (fig. 283), va s'enrouler sur une petite roue dentée qui est le dernier terme d'une série d'engrenages. On met le système en mouvement en agissant sur la manivelle d'un volant, de manière à faire monter ou descendre à volonté le réservoir : il faut avoir la précaution de soulever préalablement un cliquet servant d'arrêt à tout le système. Quant aux autres pièces, elles restent à peu de chose près les mêmes.

Machine sans robinets. — Depuis peu de temps M. Alvergniat construit des machines complètement dépourvues de robinets, et qui fonctionnent automatiquement à l'aide du simple balancement vertical du réservoir[1].

256. **Machine à mercure de Jamin.** — L'emploi d'un mécanisme particulier pour manœuvrer le réservoir A est une complication rendue nécessaire par le poids du mercure. C'est pour ne pas augmenter ce poids qu'on est obligé de limiter la capacité des réservoirs : d'où il résulte que l'on ne peut enlever qu'une faible quantité d'air à la fois, et que l'opération est nécessairement très lente.

M. Jamin a imaginé une machine à mercure qui est exempte de tous ces inconvénients, tout en conservant la supériorité des plus parfaites machines de Geissler (fig. 284).

1° *Principe.* — Le principe de cette machine consiste à réaliser le déplacement du mercure, *sans déplacer le réservoir*, par le moyen d'une machine pneumatique auxiliaire. De cette manière, on peut d'abord supprimer le mécanisme plus ou moins compliqué des machines ordinaires, et puis donner

1. Voir cette nouvelle machine dans la *Physique* de Violle, t. Ier.

aux deux réservoirs A et B une grande capacité qui permet de faire le vide rapidement dans de grands récipients.

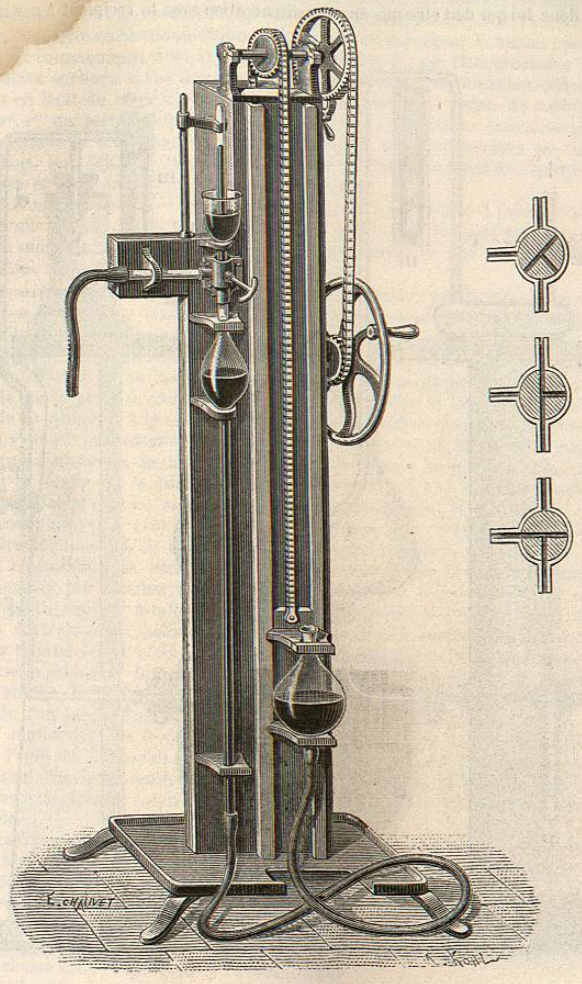

Fig. 283.

2° *Description.* — Les deux réservoirs de la machine Alvergniat sont représentés ici par les deux vases fixes R et R′, superposés l'un à l'autre et emboîtés l'un dans l'autre par leurs goulots (fig. 284) : le vase inférieur R est celui qui y rem-

place le vase mobile d'Alvergniat ; une tubulure qui s'élève verticalement du fond de ce vase le met en communication avec le vase R'. C'est ce dernier qui doit jouer dans le fonctionnement de la machine le rôle de *chambre barométrique :* c'est donc lui qui doit être mis en communication avec le récipient à gaz inté-

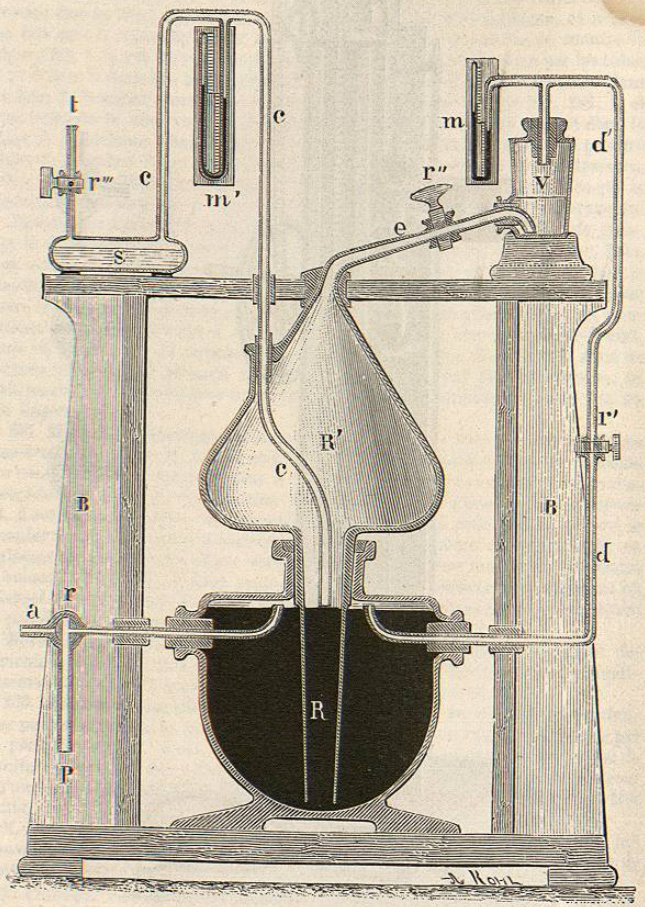

Fig. 284.

rieur, par l'intermédiaire d'un tube abducteur *cct*, lequel est muni, sur son trajet, d'un manomètre *m'* et d'un barboteur à acide sulfurique S, tout comme le tube correspondant de la machine Alvergniat. Ce tube abducteur vient déboucher dans le réservoir aussi bas que possible : nous verrons tout à l'heure pourquoi

Quant au réservoir R, qui est plein de mercure lorsque la machine est au repos, il est muni de deux tubes abducteurs : l'un, *rap*, peut le mettre en communication, tour à tour avec l'atmosphère extérieure et avec une machine pneumatique ordinaire, grâce à un robinet à trois voies *r*, convenablement placé ; l'autre, *dr'd'*, peut le mettre en communication avec un flacon expurgeur V, lequel peut également communiquer avec le réservoir supérieur R', par l'intermédiaire d'une tubulure inclinée *e*. Ces deux derniers tubes abducteurs viennent déboucher tout en haut du réservoir R. Enfin, tous ces tubes sont munis de robinets *r*, *r'*, *r''*, *r'''* qui permettent d'ouvrir ou de fermer à volonté les communications. L'ensemble de cette machine, qui est toute en verre, est soutenu par un bâti en bois, qui doit être très solide, à cause de l'énorme poids de mercure qui est mis en mouvement par le jeu de la machine.

3° *Fonctionnement.* — Le récipient inférieur R est destiné à jouer le rôle du réservoir des machines Alvergniat : nous l'appellerons le *réservoir ;* et le récipient supérieur R' est destiné à aspirer l'air comme le vase fixe de la même machine : nous l'appellerons donc l'*aspirateur*.

Première opération. — La première chose à faire, c'est de vider l'aspirateur R', c'est-à-dire de le transformer en une chambre barométrique, qu'on mettra ensuite en communication avec le récipient à gaz extérieur.

Cette opération, qu'on fait dans la machine Alvergniat en déplaçant le réservoir, s'effectue ici au moyen d'une machine pneumatique auxiliaire et avec l'aide de la pression extérieure. Pour cela, on relie le tube abducteur *ra*, à l'aide du robinet *r*, à la machine pneumatique, puis on ouvre tous les robinets, sauf *r''* et *r'''* : en manœuvrant la machine auxiliaire, on fait le vide dans tout l'appareil au-dessus du mercure ; on cesse de pomper lorsque les manomètres *m* et *m'* marquent la limite du vide correspondant à la machine employée. On ferme alors tous les robinets, et, à l'aide du robinet à trois voies, on coupe la communication avec la machine auxiliaire pour l'établir avec l'atmosphère extérieure. L'air rentre alors au-dessus du mercure et exerce une pression croissante à sa surface : le mercure monte par la tubulure centrale, commence par boucher la tubulure *c* et vient peu à peu remplir le réservoir R'. La hauteur totale des deux vases au-dessus de l'orifice de la tubulure centrale étant inférieure à $0^m,76$, le mercure monte jusqu'au sommet de la tubulure *e*, et n'est arrêté que par la petite masse d'air qu'il comprime contre le robinet *r'''* fermé : si donc on ouvre celui-ci au moment où l'équilibre est atteint, le mercure recommence à monter, en poussant devant lui le résidu d'air jusque dans le flacon V, qui sert ainsi d'*expurgeur*.

Si maintenant on ferme le robinet *r'''*, et qu'on fasse de nouveau le vide en R à l'aide de la machine auxiliaire, le mercure n'étant plus soutenu par la pression extérieure retombe en R par son propre poids, et laisse le vide en R' au-dessous de lui : l'aspirateur R est alors transformé en chambre barométrique.

Deuxième opération. — On n'a plus qu'à ouvrir le robinet *p'''* pour produire une aspiration considérable dans le récipient extérieur qui est adapté au tube abducteur *t*.

Troisième opération. — On referme alors *r'''*, on rétablit en *r* la communication avec la machine pneumatique, on refait le vide dans tout l'appareil, comme précédemment, jusqu'à la limite ; puis on fait remonter le mercure en R', et l'on chasse dans l'expurgeur le résidu de gaz.

On n'a qu'à répéter indéfiniment cette série d'opérations pour pousser le vide dans le récipient extérieur aussi loin qu'on le veut.

Remarques. — 1° C'est le manomètre *m'* qui indique par l'immobilité de ses niveaux si l'on a atteint la *limite pratique* du vide ; car il n'y a pas de *limite théorique*.

2° Comme le réservoir M a une capacité d'environ 10 litres, on voit que la

machine produira à chaque opération un abaissement de pression considérable, surtout si le récipient qu'on veut épuiser n'est pas très grand. — Si, par exemple, il a une capacité de 1 litre, la pression s'abaisse à chaque fois dans le rapport de 1 à 11; s'il était de $0^{m},1$, ce serait le rapport de 1 à 110.

3° On pourrait substituer au mercure un liquide peu volatil, tel que l'acide sulfurique concentré. La machine deviendrait beaucoup moins lourde, beaucoup moins coûteuse, et donnerait un vide sec jusqu'à la limite de la tension de vapeur que possède le liquide, à la température de l'opération.

CHAPITRE VI

APPLICATIONS DE L'ÉLASTICITÉ DES GAZ

—

POMPES DE COMPRESSION. — TROMPES SOUFFLANTES ET ASPIRANTES. APPLICATIONS DE L'AIR COMPRIMÉ.

257. **Machines de compression.** — De même qu'on peut raréfier l'air et tous les gaz dans un récipient grâce à leur expansibilité, de même on peut les y comprimer grâce à leur compressibilité. On pourra ensuite utiliser, comme un ressort métallique, cette masse gazeuse comprimée, qui se détendra, grâce à son élasticité, dès qu'on lui ouvrira une issue.

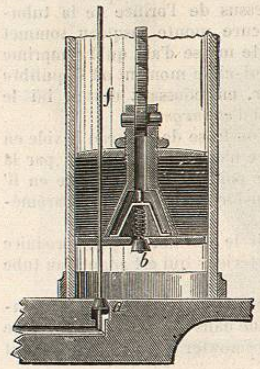

Fig. 285.

La compression de l'air et des gaz s'effectue à l'aide d'instruments spéciaux, appelés *machines* ou *pompes de compression*.

Machine à deux corps de pompe. — Une machine pneumatique ordinaire, dans laquelle le jeu des soupapes serait renversé, pourrait servir de machine de compression. Tandis que dans la machine pneumatique les soupapes s'ouvrent de bas en haut, ici elle s'ouvriraient de haut en bas (fig. 285). La soupape *b* réglerait la communication entre le cylindre et l'atmosphère extérieure (ou le réservoir à gaz); la soupape *a* réglerait celle du cylindre avec le récipient où l'on doit comprimer le gaz. Lorsque le piston monterait, l'air se raréfiant en dessous,

la soupape *a* resterait fermée et la soupape inférieure *b* s'ouvrirait par l'effet de la pression atmosphérique : l'air extérieur entrerait alors, par le conduit extérieur du piston, dans le corps de pompe. Lorsque le piston descendrait, l'air qui est au-dessous se comprimant maintiendrait la soupape *b* fermée, tandis que la soupape *a* s'ouvrant donnerait passage à l'air refoulé, qui se rendrait dans le récipient.

Cette forme de machine à deux corps de pompe a été construite, et se rencontre encore dans les vieilles collections : c'est celle

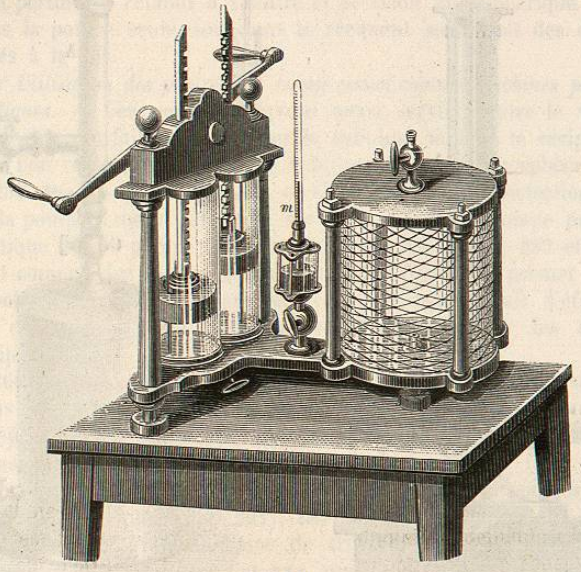

Fig. 286

que représente la figure 286. Elle rappelle extérieurement la machine pneumatique ordinaire : le récipient seul paraît différent ; c'est ici un cylindre en toile métallique solidement serré entre deux platines, par un système de colonnes et d'écrous.

Mais l'appareil ainsi construit est à la fois incommode, volumineux et peu solide. Il a été complètement abandonné et remplacé par des machines à un seul cylindre et à simple effet, dites *pompes de compression*.

258. **Pompe à main.** — C'est la plus simple et la plus commode