

Se sube el depósito C hasta el punto más alto de la ranura y se echa mercurio en él, después de poner la llave en la posición núm. 1. El mercurio baja por el tubo, y en virtud del equilibrio de los vasos comunicantes sube hasta el recipiente A, llenándolo, y llega hasta la cubeta.

Colócase entonces la llave en la posición núm. 2, y se baja el recipiente C hasta la parte inferior de la ranura. Como se corta la comunicación, el mercurio queda en la cubeta D, pero el de A desciende hasta que la diferencia de nivel del mercurio en C y en el tubo sea igual á la presión atmosférica. Se ha hecho, pues, el vacío barométrico en A, y esta es la posición indicada en la figura 90.

Si se da entonces vuelta á la llave poniéndola en la posición núm. 3; la campana, que no está figurada aquí, pero á la cual va á parar el tubo E, comunica con A; el gas ó el aire que aquélla contiene se difunde en este depósito, y se obtiene un vacío parcial. Así queda terminado el primer período de la operación, análogo al movimiento de un golpe de émbolo, y haciendo una serie de maniobras semejantes se obtendrá el grado de vacío apetecido.

Con la máquina Alvergriat se llega á producir un vacío hasta $\frac{1}{10}$ de milímetro. Pero como la manipulación es larga y penosa, no se hace uso de aquélla sino para extraer el aire de espacios muy reducidos, ó si se trata de espacios más considerables, para terminar el trabajo empezado con las máquinas neumáticas ordinarias.

Al hacer M. Crookes sus curiosos experimentos sobre los fenómenos que se presentan en los gases enrarecidos, ha añadido á este aparato ciertas disposiciones especiales y logrado así obtener en un globo de trece centímetros un vacío hasta de una millonésima de atmósfera, esto es, menos de un milésimo de milímetro de mercurio.

III

VARIOS EXPERIMENTOS QUE SE EFECTÚAN CON LA MÁQUINA NEUMÁTICA

Hemos tenido muchas veces ocasión de describir algunos curiosos experimentos hechos con la máquina neumática, y más adelante habremos de ocuparnos de otros relativos á los fenómenos del calor, del sonido y de la electricidad. Por ahora nos contentaremos con indicar alguno que otro más que tiene conexión con los fenómenos de la gravedad.

Por ejemplo, es fácil comprobar que el agua contiene ordinariamente aire en disolución, mantenido en ella por efecto de la presión atmosférica. Si se pone bajo el recipiente de la máquina neumática un vaso lleno de agua que no haya hervido, vese cómo se escapan del líquido muchas burbujillas de aire, mientras otras, adheridas á las paredes del vaso, aumentan poco á poco de volumen á medida que la presión disminuye, se desprenden de aquéllas y suben á la superficie del agua. Si se han echado en ésta cuerpos sólidos, como fragmentos de cristal, de madera ó de metal, ó granos de arena, etc., ocurre el mismo fenómeno en la superficie de cada uno de ellos, lo que prueba que todos los cuerpos tienen la propiedad de retener adherente á su superficie cierta cantidad de aire que la presión atmosférica mantiene fija en ella. El humo, que se remonta á la atmósfera sobre las capas inferiores, cae en el vacío como una masa pesada.

Este fenómeno demuestra que el principio de Arquímedes es tan cierto respecto de los gases como respecto de los líquidos, y así lo atestigua además otro experimento que se hace con un pequeño aparato llamado *baroscopio*, inventado por Otto de Guericke.

Dicho aparato consiste en una balanza que sostiene una bola metálica en un extremo, y en el otro una esfera de metal también, hueca, de paredes delgadas y de volumen mucho mayor que la bola; pesados en el aire, ambos cuerpos se equilibran exactamente (fig. 91). Cuando se pone este aparato en la campana de la máquina neumática, empieza á perturbarse el equilibrio á medida que se va haciendo el vacío, y la balanza se inclina hacia la esfera más voluminosa. Por consiguiente, esta esfera perdía en el aire cierta parte de su peso, que, según se sabe, es precisamente igual al del aire desalojado por ella. Esto nos prueba que para conocer el peso exacto de los cuerpos es menester pesarlos en el vacío, ó á lo menos tener en cuenta el error ocasionado por el empuje del aire; así es que cuando se quieren hacer pesadas rigurosamente exactas en química, ó determinar con precisión las densidades de los cuerpos, es de todo punto indispensable esta corrección.

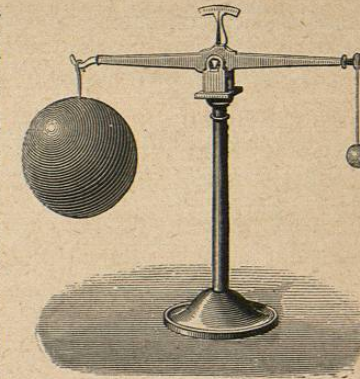


Fig. 91.—Baroscopio

La aplicación del principio de Arquímedes á los globos aerostáticos será objeto de una descripción ulterior. También dejaremos para el mismo capítulo la descripción de las aplicaciones de la máquina neumática á varios usos industriales.

IV

MÁQUINA PARA COMPRIMIR LOS GASES, Ó BOMBA DE COMPRESIÓN

En lugar de hacer el vacío en una vasija ó recipiente, se puede, por el contrario, acumular, comprimir en ella el aire ú otros gases. Esta operación se efectúa con la máquina ó bomba de compresión.

Constrúyense máquinas de compresión absolutamente semejantes á las neumáticas, ó por lo menos que no difieren de ellas sino por una modificación, cual es la de que todas las válvulas están ó se abren en dirección contraria. Examinando la figura 92, que representa la sección vertical de una bomba de compresión, se verá inmediatamente cuál es el juego del mecanismo y se comprenderá que el movimiento de subida y bajada del émbolo, en lugar de enrarecer ó de expulsar el aire, debe, por el contrario, acumularlo y comprimirlo.

La válvula *a* abre ó cierra la comunicación entre el recipiente y el cuerpo de bomba; la válvula *b* efectúa las mismas funciones entre este último y el aire exterior. Ambas se abren de arriba abajo. Supongamos que el émbolo está en el punto culminante de su carrera, y todo el aparato lleno de aire á la presión atmosférica. Al hundir el émbolo, el aire del cuerpo de bomba se comprime, su tensión aumenta, cierra la válvula *b* y abre la *a*, rechazando el aire al conducto que comunica con el recipiente y hasta al recipiente mismo. Al levantar el émbolo, se hace el vacío bajo él; el aire ya comprimido del recipiente cierra la válvula *a*, el aire exterior abre la *b* y acaba por llenar el cuerpo de bomba. Bajando de nuevo el émbolo, se le rechazará al recipiente, y así sucesivamente.

La compresión efectuada por cada clase de máquinas tiene un límite que depende del *espacio perjudicial* que queda debajo del émbolo cuando éste ha llegado á la parte inferior de su carrera. Cuando la compresión realizada es tal que el aire del cuerpo de

bomba reducido á este espacio tiene menos tensión que el aire comprimido, el juego de la válvula *a* es ya imposible.

Hoy se hace uso con preferencia de máquinas de compresión de un solo cuerpo, de émbolo macizo, y cuyas válvulas están situadas en el fondo del cilindro, una de ellas en comunicación con el aire exterior y la otra con el recipiente (1) (figs. 93 y 94). Si se

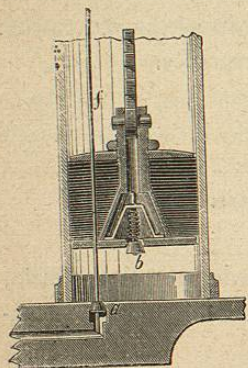


Fig. 92.—Máquina de compresión: sección de uno de los cuerpos de bomba y del émbolo

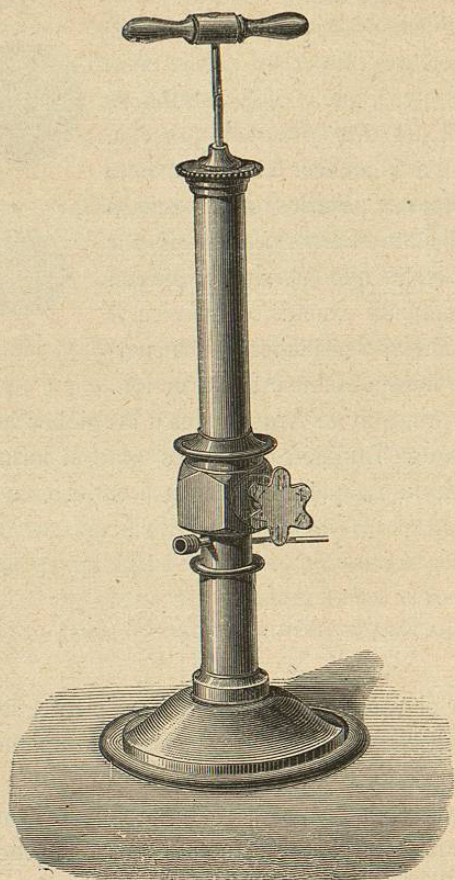


Fig. 93.—Bomba de compresión de Silbermann

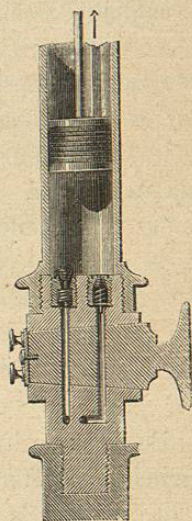


Fig. 94.—Sección vertical de la bomba de compresión de Silbermann

trata de comprimir un gas que no sea el aire, la primera válvula comunica con la vasija que contiene el gas que se ha de comprimir. Si se desea una compresión más rápida, se hace uso de bombas acopladas. La figura 95 representa la disposición general de esta clase de bombas. M. Regnault se ha valido de ellas para obtener aire ó vapor á una presión equivalente á 30 veces la atmosférica, ó en otros términos, capaz de soportar una columna de mercurio de 30 veces 76 centímetros, ó sea 22^m,80. Al tratar de las aplicaciones industriales del aire comprimido, haremos mención de otros procedimientos para obtener la compresión del aire en grandes masas.

(1) La bomba de compresión de esta clase, cuya vista exterior y sección vertical representamos en las figuras anteriores, ha sido inventada por M. J. Silbermann, preparador de la asignatura de física en el Colegio de Francia. Si contáramos con el espacio suficiente, diríamos cómo se puede comprimir en un recipiente el aire ó cualquier gas contenido en otro, merced á la llave cuya posición se ve debajo de las válvulas, invertir el orden de comunicación de los recipientes, restablecer entre ellos el equilibrio de presión, y por último hacer que comunique cada uno de ellos con la atmósfera. Por consiguiente, puede servir como se quiera de máquina neumática ó de máquina de compresión.

V

LEY DE MARIOTTE

Digamos ahora en qué principio se basan los físicos para valuar las presiones de los gases, y qué ley siguen las variaciones de estas presiones, en virtud de la sola influencia del cambio de volumen. Esta ley, descubierta por los físicos Mariotte y Boyle (1), se

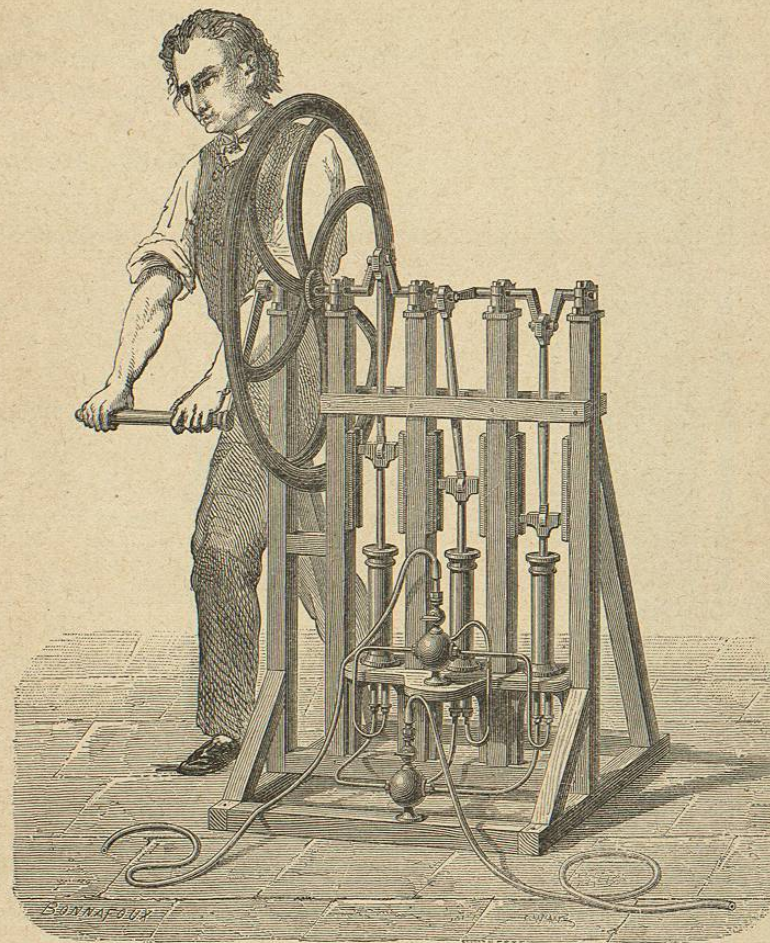


Fig. 95.—Bombas de compresión acopladas

enuncia del modo siguiente: *Si se somete una misma masa gaseosa á una serie de presiones diferentes, los volúmenes que sucesivamente ocupa varían en razón inversa de las presiones ejercidas.*

He aquí la demostración experimental de esta ley:

En una tablilla de madera situada verticalmente se pone un largo tubo encorvado cuyo brazo ó rama menor está cerrado y el mayor abierto. Si este tubo es perfecta-

(1) En Inglaterra se llama *ley de Boyle* á la que se conoce en Francia con el nombre de Mariotte. En efecto, ambos físicos la descubrieron por la misma época. Al principio no se la aplicaba más que al aire atmosférico, como lo prueban los títulos de las obras en que se consignaron los experimentos sobre la fuerza elástica del aire y sobre sus grados correspondientes de condensación. Dichos títulos son: R. Boyle, *Nova experimenta physico-mechanica de vi aeris elastica*; Mariotte, *De la nature de l'air*.

mente cilíndrico, la escala dividida en partes iguales que se ve en la tablilla (fig. 96) indicará capacidades ó volúmenes iguales; si no es cilíndrico, se le divide en partes desiguales, pero de la misma capacidad. Introduzcamos en él cierta cantidad de mercurio, y mediante algunas ligeras sacudidas hagamos de modo que el líquido se reparta en dos columnas de la misma altura cuyos niveles correspondan á los ceros de las dos escalas. En este momento hay equilibrio entre el aire exterior que comprime el mercurio de la

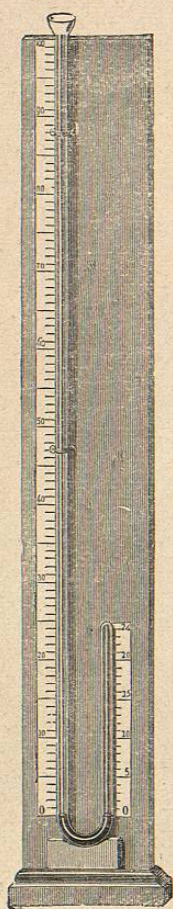


Fig. 96.—Comprobación experimental de la ley de Mariotte

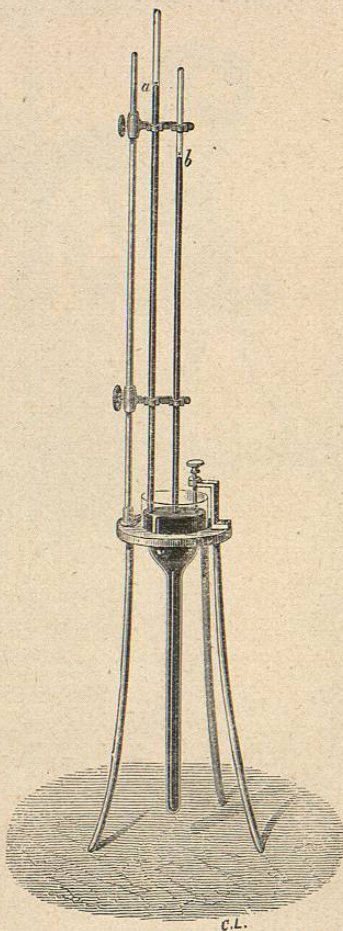


Fig. 97.—Comprobación de la ley de Mariotte para las presiones decrecientes inferiores á la presión atmosférica

rama mayor abierta, y el aire interior contenido en la rama cerrada, y por consiguiente la presión de este último es de una atmósfera.

Si echamos ahora mercurio en el brazo mayor, quedará roto el equilibrio y el líquido subirá en el brazo menor. Detengámonos en el momento en que el nivel llegue á la división 12, es decir, en que el volumen del gas haya quedado reducido á la mitad, y notaremos que la diferencia de los niveles del mercurio es precisamente igual á la altura barométrica en el momento de la experimentación; luego es claro que en tal momento esta diferencia de nivel es la que indica el aumento de presión del gas encerrado, y por consiguiente la presión total es de dos atmósferas.

Vertiendo de nuevo mercurio en la rama mayor, veráse que el nivel sube en la menor hasta las divisiones 16, 18, 19,2 por ejemplo, lo que supone el volumen del gas

reducido al tercio, al cuarto, al quinto de su volumen primitivo, y entonces se observará que las presiones son sucesivamente de 3, 4, 5 atmósferas. En términos generales, los volúmenes ocupados por el aire ó por cualquier otro gas varían precisamente en razón inversa de las presiones que este gas soporta; lo cual demuestra la ley enunciada.

Con la misma facilidad se comprueba esta ley cuando se somete la masa gaseosa á presiones decrecientes, inferiores á una atmósfera: los volúmenes aumentan como las presiones disminuyen. Esta comprobación de la ley de Mariotte respecto de las presiones inferiores á la atmosférica se hace con el aparato representado en la figura 97. En una cubeta llena de mercurio se colocan dos tubos barométricos: el uno de ellos, inmóvil, marca por el nivel *a* del mercurio la presión de la atmósfera en el momento del experimento; el otro tubo es movable y se puede sacar ó meter como se quiera en la prolongación inferior de la cubeta. Antes de introducir el gas, el nivel del mercurio se eleva en este tubo á la misma altura que en el barómetro vecino. Pero si en el vacío se introduce cierta cantidad de gas, este nivel se deprime y baja á un punto *b*, de suerte que la diferencia de nivel *a b*, expresada en milímetros, mide la presión del gas. Levantando el tubo, el gas se dilata y la presión aumenta, resultando que el producto del volumen por la presión correspondiente es constante.

Para hacer esta comprobación, importa mucho que el tubo en que se introduce el gas sea perfectamente cilíndrico, ó en el caso de que no se llene esta condición, que á la división en milímetros que miden las presiones vaya unida una disminución en partes de igual capacidad para medir los volúmenes.

Vese por esta ley, cuya importancia es muy grande, cuán compresibles son los gases y cuánto difieren por este concepto de los líquidos, cuya compresibilidad está contenida, según hemos visto, en reducidísimos límites.

En los experimentos que preceden se ha supuesto que la temperatura es constante, sobreentendiéndose además que el aire ó los otros gases han de estar bien secos.

Si la ley de Mariotte fuese rigurosamente cierta, resultaría de ella que todos los gases están dotados de igual compresibilidad, y que esta compresibilidad es creciente, cualesquiera que sean las presiones á que se los somete. Dulong y Arago han comprobado la exactitud de esta ley, en cuanto al aire, hasta 26 atmósferas; pero Despretz y

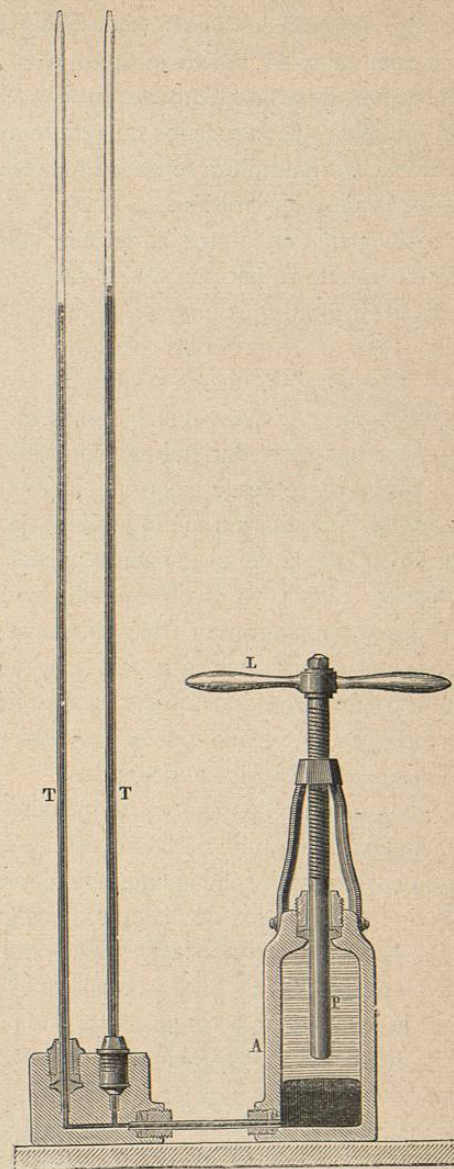


Fig. 98.—Aparato de Pouillet para demostrar la compresibilidad desigual de los gases

posteriormente Regnault han averiguado que dicha compresibilidad no era exactamente la misma respecto de los demás gases, y además que varía un tanto en un mismo gas. El aire, el nitrógeno, el ácido carbónico se comprimen en realidad algo más de lo que exigiría la ley de Mariotte; pero el gas hidrógeno se separa de ella en sentido contrario.

En cuanto á los gases susceptibles de pasar al estado líquido, la separación á que nos referimos ha resultado tanto más considerable cuanto que los experimentos se han verificado á una temperatura más próxima á aquella en que dichos gases se licúan. Es probable que, alrededor de esta temperatura, sufran aquéllos modificaciones moleculares cuya naturaleza se ignora todavía, pero que contrarían los efectos dimanados de las variaciones de presión.

La medida de la presión del aire que queda bajo la campana de la máquina neumática cuando se hace en ella el vacío, medida que se efectúa con un *manómetro* ó *barómetro* truncado, es una aplicación directa de la ley de Mariotte.

La ley que expresa las relaciones entre los volúmenes de los gases y las presiones que soportan, ó lo que es lo mismo, entre su elasticidad y su compresibilidad, es demasiado importante para que pasemos en silencio los experimentos que desde Boyle y Mariotte han ido reduciendo los límites en que era aplicable.

Reconocióse desde luego que la ley de Mariotte no es exacta relativamente á todos los gases. Van Marum fué el primero que vió que la compresibilidad del gas amoníaco es mayor que la del aire; apenas quedaba este último reducido á la tercera parte de su volumen cuando ya el otro pasaba al estado líquido, á la misma presión. Erstedt y Wendsen obtuvieron en 1826 un resultado análogo: el gas ácido sulfuroso se comprime tanto más cuanto más se acerca á su punto de liquefacción. Despretz, y Pouillet después, confirmaron estas observaciones, haciéndolas extensivas á otros gases. El aparato de la figura 98, ideado por el segundo de dichos físicos, hace patente la diferencia de compresibilidad de los varios gases.

Este aparato consiste en un cilindro de palastro A que contiene mercurio y que por medio de un tubo de hierro está en comunicación con una caja de palastro también, en la cual encajan sólidamente dos tubos T T, de dos metros de largo cada uno, y de dos á tres milímetros de diámetro. Los gases secos cuya compresibilidad se desea comparar se introducen por la parte superior de dichos tubos, que deben estar perfectamente calibrados. Se hace de modo que los gases ocupen el mismo volumen, y luego se cierran los tubos á la lámpara. En este momento, la presión y el volumen son idénticos para ambos gases. Para hacerlos variar, se cierra el cilindro A, lleno de aceite por encima del mercurio, con un émbolo P que en su parte superior es un tornillo que gira en una tuerca. Merced á una palanca L se puede introducir hasta donde se quiere el émbolo en el líquido comprimiendo de esta suerte el mercurio, el cual transmite su presión á los gases de los dos tubos T T. Por tal medio se reconoce que los volúmenes no continúan los mismos, y que la ley de compresión varía de un gas á otro.

Erstedt y Wendsen encontraron exacta la ley de Mariotte, en cuanto al aire, hasta 8 atmósferas, y los famosos experimentos de Dulong y Arago, que tan sólo hemos mencionado, avanzaron la comprobación hasta 26 atmósferas. Pouillet la llevó hasta 100. Pero en los procedimientos empleados había varias causas de error, la más sensible de las cuales procedía de que cuanto mayor era la presión, más reducido era el volumen ocupado en el manómetro por el gas, convirtiéndose los errores constantes de lectura en fracciones importantes de los resultados.

M. Regnault obvió esta causa de inexactitud disponiendo sus aparatos (fig. 99) de modo que los volúmenes subsistiesen casi constantes mientras durase el experimento. Hizo más de una serie de correcciones á cuyo detalle no podemos descender y que die-

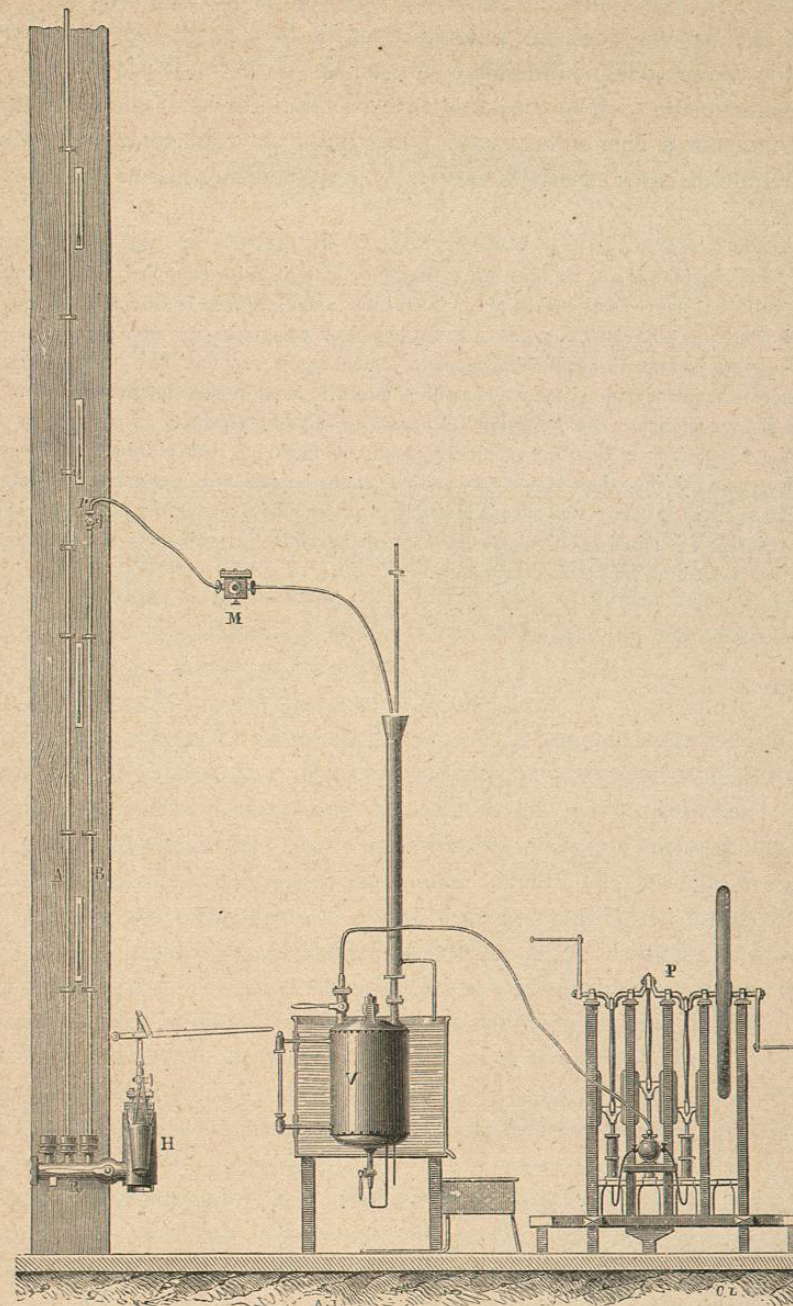


Fig. 99.—Aparato de M. Regnault para el estudio de la compresibilidad de los gases (1).

ron notable precisión á los resultados de sus investigaciones, resultados que resumiremos en sus caracteres esenciales.

(1) A, B, tubos del manómetro que sirven para medir las presiones y los volúmenes del gas con el que se hace el experimento, comunican por sus extremos inferiores y por un cilindro de hierro, al cual están