

La corrección varía con la presión barométrica observada y también con la temperatura. Pero importa hacer dos advertencias acerca de este punto; consiste la primera en que la presión á la cual se aplica la corrección es la altura barométrica previamente *reducida á 0°*, según la regla que hemos dado más arriba; la segunda, en que la temperatura de que aquí se trata no es ya la que indica el termómetro adaptado al instrumento, sino la que se observará con el auxilio de otro termómetro colocado exteriormente ó al aire libre. Claro está que la corrección indicada por la tabla será siempre aditiva para todas las estaciones situadas sobre el nivel del mar. Si por excepción se tratase de observaciones hechas debajo de este nivel, por ejemplo en una mina, y se las quisiera reducir al horizonte del mar, la corrección será *negativa ó sustractiva*. Es una circunstancia de la cual no tenemos noticia que se aplique todavía á ninguna estación meteorológica. Sin embargo, á orillas del mar Caspio ó del Muerto, la reducción al nivel del Océano disminuiría la presión barométrica en lugar de aumentarla.

Los barómetros de mercurio son los únicos que dan observaciones precisas. Por desgracia, los instrumentos bien contruídos cuestan mucho; su instalación requiere precauciones, y hasta su observación exige, aparte de una gran atención en la lectura, correcciones bastante prolijas que son molestas cuando se las repite con frecuencia. Yendo de viaje, pueden quedar inservibles ó destruídos si no se toman para su transporte medidas que no siempre están al alcance de los observadores, sobre todo si exploran países poco conocidos ó poco civilizados. Véanse las recomendaciones que encontramos en las *Instrucciones* de la Oficina central meteorológica, y que creemos oportuno reproducir para conocimiento de aquellos de nuestros lectores que tengan que hacer uso del barómetro de mercurio:

“Una vez colocado el barómetro, no se le debe cambiar de sitio sino por una causa imperiosa. Si hubiera que transportarle, sería preciso subir el tornillo de la cubeta para que el mercurio llene todo el tubo, y en seguida volver el instrumento de abajo arriba y llevarlo invertido con la cubeta en la parte superior. El transporte de un barómetro requiere cuidado y grandes precauciones. Cualquiera barómetro puede quedar inservible aunque no se rompa; basta para ello que se introduzca un poco de aire en el tubo. Para cerciorarse de si ha ocurrido ó no este percance durante el transporte, se examina ante todo el barómetro en su caja, y luego se le saca levantándolo despacio. Se desatornilla un tanto el tornillo de la cubeta para que baje la columna de mercurio en el tubo, y se inclina el instrumento de modo que el líquido dé contra el extremo de aquél. Si no contiene aire, el choque es claro, metálico, vibrante; si ha penetrado alguna burbuja de aire, el golpe es sordo. Con los barómetros marinos no puede hacerse esta prueba; los movimientos de su mercurio son demasiado lentos para que el choque del mercurio produzca un sonido bien claro. A veces se puede purgar un barómetro que contenga aire mediante una serie prolongada de choques ó de trepidaciones, volviendo el instrumento de modo que la cubeta quede arriba. Para este ensayo convendría un viaje de unos cuantos kilómetros en un carruaje ó en camino de hierro. Si se tuviera que desarmar el aparato para purgarlo de aire, se correría el riesgo de no volver á poner exactamente la escala en su punto, siendo necesaria una nueva comparación.”

En el primer tomo de esta obra hemos descrito los barómetros metálicos, *holostéricos ó aneroides*, y en particular los de Bourdón y de Vidie. Estos instrumentos marcan la presión atmosférica de la hora y del lugar de la observación en un cuadrante graduado por comparación con un barómetro de mercurio. Pero como el movimiento de la aguja depende de la acción de un muelle y de la acción de la presión del aire

sobre un tubo ó sobre un tambor metálico de paredes muy delgadas, y la elasticidad de estas paredes varía con la temperatura y se modifica lentamente con el tiempo, las indicaciones del barómetro aneroide carecen de precisión, haciéndose además con dificultad la corrección de la temperatura, á no ser que se estudie y forme para cada instrumento una tabla de corrección especial. Es importante hacer á menudo la comparación con un barómetro de mercurio.

Cuando el aneroide se ha de instalar de un modo fijo y estable, se le suele arreglar

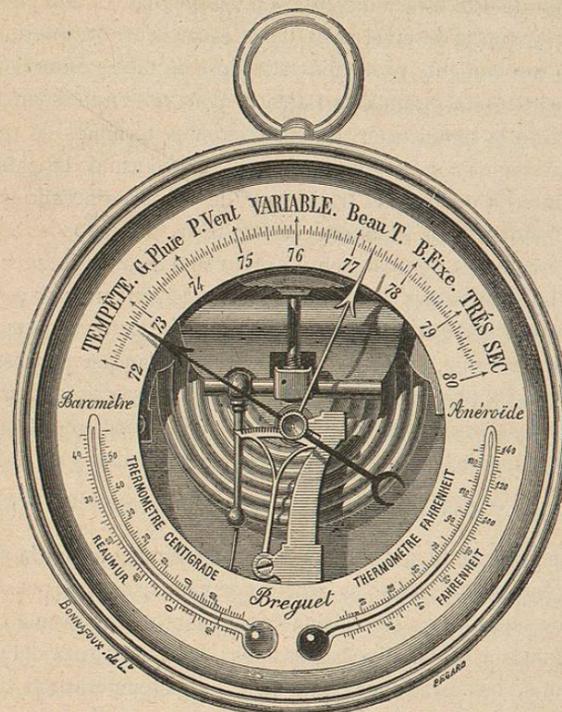


Fig. 33.—Barómetro holostérico ó aneroide de Vidie

de modo que marque directamente la presión reducida al nivel del mar. Los constructores, á quienes el observador debe indicar la altitud del lugar en que se ha de instalar el instrumento, son los encargados de hacer esta regulación. En cuanto á la comparación que se debe efectuar á menudo con un barómetro patrón, sólo exige un arreglo fácil de verificar con un tornillo colocado en el fondo de la caja metálica del instrumento. Dando vueltas á este tornillo en un sentido ó en otro, se hace marchar la aguja á derecha ó izquierda, recorriendo el número de divisiones requeridas para efectuar la corrección; estas vueltas del tornillo se han de dar despacio y con precaución.

Los marinos, los viajeros y los aeronautas se sirven con frecuencia del barómetro metálico, cuya imperfección está compensada con la comodidad de su uso y la facilidad de su transporte. Si no da indicaciones que vayan acompañadas de la precisión necesaria para las investigaciones científicas, en cambio basta para seguir en él las variaciones de la presión atmosférica, y cuando está recién comparado y arreglado, permite calcular con la conveniente aproximación la altura á la que se eleva, por ejemplo, un globo en la atmósfera. Es el instrumento casi universal adoptado en las estaciones meteorológicas agrícolas.

II

MEDICIÓN DE ALTURAS CON EL BARÓMETRO

Una de las aplicaciones más útiles é interesantes del barómetro es el cálculo que merced á él se puede hacer, ya de la altitud absoluta de la estación en que se observa, es decir, de la altura de esta estación sobre el nivel del mar, ó bien de su altitud relativa, esto es, de la diferencia de nivel entre dicha estación y otra inferior. Hemos dicho ya que se consigue resolver este problema valiéndose de tablas numéricas que han sido calculadas con arreglo á una fórmula de Laplace. Pero nos resta decir en qué consiste esta fórmula y cuál es la significación de los diferentes términos de que se compone. En seguida demostraremos con un ejemplo cómo se hace uso de las tablas en cuestión.

Hemos visto anteriormente que, tratándose de escasas diferencias de altitud, un descenso de un milímetro en la altura barométrica corresponde á una elevación de 10^m,517. Pero esto no es rigurosamente exacto sino á partir del nivel del mar, á los 45° de latitud y á la temperatura del hielo fundente. Cuanto mayor es la altura en la atmósfera, más decrece la densidad de las capas de aire sucesivas, y si la temperatura de todas estas fuese uniforme, mientras las alturas crecerían en progresión aritmética, la densidad decrecería en progresión geométrica. Las alturas serían así proporcionales á los logaritmos de las densidades, y podrían calcularse mediante una fórmula muy sencilla. Llamando H_a y H_b las alturas barométricas reducidas á 0° de la estación superior y de la inferior, y z su diferencia de nivel, tendríamos $z = 18,405^m \times \frac{\log H_b}{\log H_a}$.

El coeficiente constante 18,405 metros ha sido determinado por la observación (1), pero el valor de z encontrado así no es exacto por varias razones, puesto que las condiciones que hemos supuesto no se realizan comúnmente. Exigirá una serie de correcciones de la que vamos á hablar. En primer lugar, la temperatura del aire no es igual á 0° ni la misma en ambas estaciones. Sean T_a y T_b las temperaturas del aire exterior en cada estación en el momento de la observación. Las más de las veces T_a es superior á T_b , de suerte que la temperatura media $\frac{1}{2}(T_a + T_b)$ de la capa de aire comprendida entre las dos estaciones es mayor que T_a , y la altura de esta capa superior á la que se ha calculado. Será preciso multiplicar z por un término que depende del coeficiente de la dilatación del aire (2). Con esta corrección el valor de z será

$$z' = 18,405^m \log \frac{H_a}{H_b} \left(1 + \frac{T_a + T_b}{545} \right)$$

(1) Una sola observación puede bastar. Por lo demás, y según lo que precede, el coeficiente puede calcularse dividiendo la distancia 10^{mm},517 por la diferencia de los logaritmos de los números 0^{mm},760 y 0^{mm},759 que miden la presión, á 0° y al nivel del mar, correspondiente á una elevación vertical de 10^{mm},517. Por este método directo, fundado en la relación del peso del aire con el peso del mercurio, calculó Halley el coeficiente numérico de la fórmula, á la verdad incompleta, que dió para la medición de alturas. Hay otro método que consiste en deducir el valor numérico del coeficiente de la medición geométrica de una altura. Introduciendo esta medición en la fórmula barométrica, y tomando el coeficiente por incógnita, se deduce su valor. Deluc, Shuckburg, Roi y Ramond se valían de este método. Laplace deducía 18,336 por el primero; Ramond 18,393 por el segundo.

(2) Por la unidad sumada con el producto de este coeficiente por el número de grados de la temperatura media, ó lo que es lo mismo por $1 + 0,00367 \frac{T_a + T_b}{2}$. Hechos los cálculos, resulta $\frac{T_a + T_b}{545}$.

En segundo lugar, hay que tener en cuenta la latitud de la estación, latitud que puede ser mayor ó menor de 45°. La influencia que interviene aquí es la variación de intensidad de la gravedad, puesto que, según hemos visto en el primer tomo del MUNDO FÍSICO, la intensidad de la gravedad va aumentando del ecuador al polo. Cuanto más cerca se está del ecuador, más hay que elevarse en el aire para obtener una diferencia dada en la presión barométrica. Naturalmente, sucede lo contrario si se va del polo al ecuador. La corrección que de aquí resulta consiste en agregar el valor z' ó en restar de él un término que es igual al producto de z' por 0,00265 cos 2 L, siendo L la latitud del lugar. Hay que añadir también una corrección procedente de que la gravedad varía también de intensidad en el intervalo que separa la estación inferior de la superior, de suerte que, en definitiva, la altitud absoluta de un lugar situado á la latitud L y en donde la altura barométrica, reducida á 0°, es H_a , siendo la barométrica H_b la del nivel del mar, da la fórmula siguiente:

$$Z = 18,405^m \log \frac{H_a}{H_b} \left(1 + \frac{T_a + T_b}{545} \right) (1 + 0,00367 \cos 2 L) \left(1 + \frac{z' + 15,989}{6.366,198} \right)$$

Si la estación inferior no se halla al nivel del mar, la fórmula anterior sólo dará la diferencia de sus altitudes; agregando la de esta última estación, se tendrá la altura de la primera sobre el Océano.

Por complicada que parezca la fórmula de Laplace, es en la práctica de un uso relativamente sencillo, gracias á las tablas numéricas con las que se pueden calcular sus diferentes términos. La primera tabla da el valor que hemos llamado z , y cuando se tiene este valor, un sencillo cálculo da z' . Por último, otra tabla da la altura buscada Z.

Presentaremos un ejemplo conocido de la aplicación de esta fórmula. Consideremos al efecto las observaciones barométricas hechas por Bravais y Martins el 29 de agosto de 1844, á un metro debajo de la cima del monte Blanco, y las que simultáneamente se efectuaron en el Observatorio de Ginebra, es decir, á una latitud media de 46°. Estando la estación inferior á una altitud conocida de 408 metros, la del monte Blanco se obtendrá calculando la diferencia de nivel de las dos estaciones con arreglo á los datos siguientes:

	Ginebra	Monte Blanco
Altura barométrica	729 ^{mm} ,65	424 ^{mm} ,05
Termómetro del barómetro.	18°,6	—4°,2
Termómetro libre.	19°,3	—7°,6

Con auxilio de la tabla inserta anteriormente, se empezará por reducir las dos alturas del barómetro á cero, lo que dará para Ginebra $H_b = 727^m,46$ y para el monte Blanco $H_b = 424^m,32$. Introduciendo estos valores en la fórmula tendremos primero $z = 4380^m,9$. La primera corrección, relativa al término $\frac{T_a + T_b}{545}$, que en este

caso vale $\frac{11,7}{545}$, nos dará la cantidad $\frac{18,405 \times 11,7}{545} = 92^m,5$, de donde $z' = 4401^m,4$.

Con la tabla III del *Anuario de la Oficina de longitudes* se conocerá la cantidad que ha de agregarse para los términos relativos á la altitud y á la disminución de la intensidad de la gravedad procedente de la diferencia aproximada de nivel entre las dos es-

taciones. Dicha cantidad es $14^m,06$ y por consiguiente el valor definitivo $Z = 4415^m,46$. Tal es la altura de la cumbre del monte Blanco referida á la estación del Observatorio de Ginebra, de suerte que si se agrega la altitud de éste, más 1 metro por la cima del mismo monte, tendremos que esta cima está á $4824^m,46$ sobre el nivel del mar (1).

En vista de este ejemplo, podría suponerse que haciendo dos observaciones simultáneas con el barómetro se podría calcular, con un decímetro de diferencia, una altitud



Fig. 34.—Observaciones barométricas en las montañas. Medición de alturas

relativa ó absoluta; pero en rigor no es así, por cuanto la fórmula y las tablas que de ella se desprenden, suponen que las densidades de las capas de aire decrecen con una uniformidad de que casi nunca se ha dado caso. Por otra parte, sucede muy pocas veces en la práctica que puedan hacerse observaciones simultáneas, y que aun conseguidas éstas, se logre comparar tal como sería menester los barómetros empleados en las

(1) En el *Anuario* se la fija en $4815^m,9$. Pero los coeficientes que emplea son los de la fórmula misma de Laplace; nosotros hemos adoptado los nuevos coeficientes, por haberse tenido que modificar los anteriores en razón de los varios datos físicos que entran en su formación, datos que se han podido determinar con más exactitud gracias á las investigaciones de los físicos.

estaciones. En realidad, el resultado que acabamos de obtener respecto al monte Blanco difiere bastante de la cifra $4809^m,6$ que dan las mediciones geodésicas. M. Martins fija en unos $4,810^m,0$ el resultado del cálculo de las cuatro alturas barométricas tomadas en la cumbre del monte, comparadas con las observadas el mismo día en Ginebra y en varias estaciones vecinas. La casi identidad de los dos resultados es prueba de la precisión igual de los dos métodos barométricos y geométricos, ó se debe más bien á una dichosa casualidad? M. Martins se inclina á admitir la primera hipótesis; cree que en este caso el éxito ha dependido de que "las circunstancias meteorológicas habían sido propicias para obtener una buena altitud y las horas escogidas muy favorables,," en apoyo de lo cual da otras dos pruebas.

"Después de determinar M. Plantamour, director del Observatorio de Ginebra, la altura del hospicio del San Bernardo sobre el lago Lemán, haciendo dos nivelaciones directas que partiendo del lago terminaban en el umbral del convento, calculó en seguida la altura mediante diez y ocho años de observaciones barométricas correspondientes á las del Observatorio de Ginebra. El resultado de tan inmenso trabajo fué que las observaciones barométricas correspondientes, hechas de dos á cuatro de la tarde, no dan en agosto y septiembre más que un error probable de $\frac{1}{1296}$ de la altura, ó

sea 1 metro por 1,300 próximamente. Otras observaciones barométricas, hechas en mayor número que las practicadas por mí en la cumbre del monte Blanco, deben inspirar todavía más confianza. Bravais y yo hicimos en la cumbre del Faulhorn, desde el 15 de julio al 7 de agosto del año 1841, 152 observaciones barométricas continuadas día y noche de tres en tres horas. El promedio de estas observaciones da 2,682 metros como altura de dicha montaña; la cifra de la geodesia es de 2,683 metros; por consiguiente, también en este caso el barómetro compite en exactitud con el teodolito, y las observaciones barométricas efectuadas en gran número equivalen á la repetición de los ángulos medidos en el círculo del instrumento geodésico.,"

De todos modos resulta de aquí que para que el uso del barómetro dé resultados en cuya exactitud se pueda confiar respecto á la medición de alturas, requiere observaciones reiteradas y condiciones particulares. Además, el barómetro de mercurio es el que debe servir para las determinaciones. El barómetro anerode no deja también de prestar incontestables servicios á los viajeros terrestres ó aéreos, facilitándoles el conocer á cada momento la altitud aproximada de las regiones que recorren. En las expediciones que tienen por objeto investigaciones científicas, se le emplea juntamente con el barómetro de mercurio, que entonces sirve para compulsar de vez en cuando sus indicaciones.

El aeronauta inglés M. Glaisher asegura que un barómetro anerode, convenientemente verificado, le ha dado siempre las mismas indicaciones que el de mercurio, y atribuye el mal servicio de ciertos barómetros aneroides á no haberlos sometido previamente á suficientes presiones, probándolos bajo la campana de la máquina neumática; "no se habían hecho, dice, en número conveniente las comprobaciones á que habían dado lugar.,"

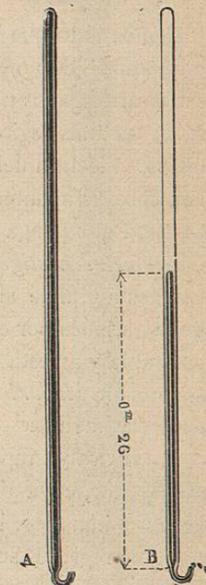


Fig. 35.—Barómetros testigos de M. Janssen

He aquí la tabla que M. Glaisher calculó para que le sirviera en sus ascensiones y merced á la cual podía conocer á toda hora la altura de la barquilla de su globo en la atmósfera:

PRESIÓN BAROMÉTRICA		ALTITUDES	
En pulgadas inglesas	En milímetros	En millas	En metros
25	657,5	1	1,609
20	508,0	2	3,215
17	431,7	3	4,827
14	355,6	4	6,436
11	279,4	5	8,045
4	101,6	10	16,090
2	50,8	15	24,135
1	25,4	20	32,180

Hemos visto que la mayor altitud á que Glaisher llegó en uno de sus viajes aéreos fué de unos 8,800 metros; el barómetro marcaba entonces 252 milímetros.

Los arriesgados navegantes que se entregan á merced de un globo, no siempre tienen en las altas regiones la sangre fría necesaria para hacer observaciones exactas; además, la lectura del barómetro no deja más rastro que los que ellos mismos trazan en su libro de apuntes. Por esto es conveniente tener en tales casos un medio de comprobación que ponga el resultado á cubierto de toda duda. Consíguese esto valiéndose de *barómetros-testigos*. Véase los que discurrió M. Janssen y que sirvieron en las ascensiones á grande altura del globo el *Zenit*, tripulado primero por Croce-Spinelli y Sivel, y después por estos animosos exploradores acompañados de M. Tissandier en su memorable y funesta ascensión de abril de 1875. En la interesante obra de M. Tissandier, titulada *Historia de mis ascensiones*, encontramos la descripción y el dibujo de dichos barómetros:

“La figura 35 representa uno de estos tubos; es grueso, largo y encorvado en la parte inferior, cuya abertura es capilar. Su longitud es de 0^m,50 y su diámetro interior de 1 á 2 milímetros. El tubo A está lleno de mercurio al remontarse el globo; cuando llega á las regiones superiores, allí donde la presión no llega á 50 centímetros, el mercurio baja y sale por la abertura capilar inferior. Si se llega á la presión de 26, por ejemplo, el mercurio bajará como se ve en B. La cantidad de mercurio que queda en el tubo al regresar marcará la presión *mínima*. No hay para qué decir que la capilaridad interior es tal que los choques no pueden hacer salir el mercurio, y que los tubos que llevan los aeronautas se embalan con cuidado, metiéndolos en una caja cerrada y sellada, cuya autenticidad se debe reconocer al bajar á tierra.”

Dos de los muchos tubos preparados con la ayuda de Berthelot, Jamín y Hervé-Mangón, tuvieron una marcha regular y marcaron como presión mínima de 264 á 262 milímetros, indicando una cifra comprendida entre 8,540 y 8,600 metros, como la altura mayor á que se había llegado.

III

MEDICIÓN DE ALTURAS POR EL PUNTO DE EBULLICIÓN DEL AGUA. — HIPÓSÓMETRO

Al remontarse á la atmósfera, no se conoce solamente la disminución de la presión por el descenso del mercurio en el tubo barométrico. Hemos visto que también produce el efecto de anticipar el punto de ebullición del agua, de suerte que un termómetro

medido en un vapor de agua cualquiera marca en el momento de sobrevenir dicha ebullición una temperatura inferior á 100° (pues ésta, según se recordará, supone una presión de 760°), y tanto más baja cuanto á mayor altitud se halle el lugar en que se nota el fenómeno. La mayor tensión que corresponde á esta temperatura es precisamente igual á la presión atmosférica en el punto en que se hace la observación. Como hay tablas de las tensiones del vapor de agua á todas las temperaturas, se podrá averiguar por ellas la presión, sin necesidad de consultar el barómetro. Wollaston fué el primero que, á causa de la dificultad de transportar el barómetro de mercurio, propuso sustituir este instrumento con el termómetro y observar la temperatura de la ebullición del agua. Dase el nombre de *hipsómetros* á los aparatos contruidos con este objeto especial: el que representa la figura 36 es el de Regnault. Como se ve, se compone de una pequeña caldera cilindro-esférica, que contiene el agua que se ha de hervir, para lo cual basta una lámpara de alcohol. Sobre la caldera hay un tubo dividido en partes que entran unas en otras como las de los anteojos, y dentro del cual se pone el termómetro, cuyos depósito y tubo quedan de este modo sumergidos en el vapor del agua hirviente (1). Como una variación de un décimo de grado, cuando se llega cerca de los 100°, corresponde á una diferencia de 2^{mm},7 en la presión, los termómetros de que se hace uso deben ser muy sensibles. Se han formado tablas especiales para estas variaciones, y en ellas se puede encontrar la presión correspondiente; restando tan sólo en este caso apelar á la fórmula de Laplace para deducir la altura del lugar. También se recurre á tablas *hipsométricas* que dan las altitudes aproximadas correspondientes á las temperaturas de ebullición observadas, después de lo cual se hacen las correcciones relativas á la temperatura del aire y á la latitud del lugar, exactamente como para las observaciones barométricas.

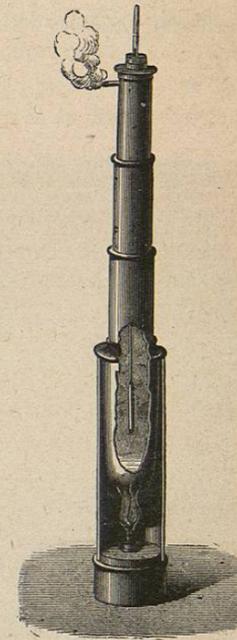


Fig. 36.—Hipsómetro de Regnault

Para terminar este artículo, volvamos á ocuparnos de la reducción de las observaciones barométricas al nivel del mar, problema que, según hemos dicho, es inverso del

(1) Al dar cuenta el ilustre físico de las observaciones hipsométricas hechas por Izarn en 1844 en los Pirineos, demuestra que para la medición de alturas se puede emplear con toda confianza la tabla de las fuerzas elásticas del vapor de agua calculada por él. “Este método, dice, ofrece grandes ventajas sobre el uso del barómetro al viajero que recorre países escabrosos, por cuanto puede obtener resultados muy exactos con un aparato de reducidas dimensiones y que no le causa molestia alguna.” En efecto, el aparato facilitado á Izarn, reducido á sus menores dimensiones con sus tubos reentrantes, no pasaba de 16 centímetros de altura; desplegado, llegaba á 35. Bravais y Martins observaron el punto de ebullición del agua cuando su ascensión al monte Blanco en 29 de agosto de 1844, y calcularon la presión correspondiente. He aquí las cifras obtenidas á varias altitudes y en la cumbre, con algunos días de intervalo:

	Temperatura de ebullición	Presión calculada	Presión observada
Cumbre del monte Blanco.	84°,396	422 ^{mm} ,86	423 ^{mm} ,74
Gran Meseta.	87°,565	478 ,39	478 ,39
Grands Mulets.	90°,171	529 ,59	528 ,88
Chamounix.	96°,713	673 ,99	674 ,92