

IV

EXPERIMENTOS CONTEMPORÁNEOS SOBRE LA VELOCIDAD DEL SONIDO EN EL AIRE

Lleguemos ya á los experimentos más recientes.

Después de discutir Le Roux los resultados que dejamos transcritos, había llegado á convencerse de que las divergencias de los números que representaban la velocidad del sonido á 0° y al aire libre exento de humedad consistían principalmente en hacerse un cálculo demasiado bajo de la temperatura de las capas aéreas realmente recorridas por la onda sonora. De los trabajos meteorológicos contemporáneos efectuados por Becquerel, Babinet y Martins y de las observaciones hechas en globo por Glaisher resulta que la temperatura á altitudes diferentes varía con arreglo á una ley más complicada de lo que se creía, y que especialmente de noche llega, á cierta distancia, á uno ó muchos máximos. En virtud de esta suposición, ocurriósele á dicho físico la idea, que puso en práctica, de hacer nuevos experimentos en que pudiera evitar todas estas causas de error.

El principio del método ideado por Le Roux es el siguiente: colócanse á corta distancia dos membranas elásticas, verbigracia de gutapercha muy delgada: una onda sonora que las encuentra á su paso y las agita, ocasiona la interrupción de una corriente eléctrica que recorre un aparato de inducción cuya chispa imprimirá su huella en un cronoscopio arreglado con este objeto. No habiendo podido Le Roux encontrar una calma atmosférica bastante perfecta para hacer el experimento al aire libre, se limitó al siguiente caso particular:

“Determinar, sin el auxilio del oído, la velocidad de propagación de una conmoción aislada en una masa gaseosa exenta de humedad, de temperatura exactamente conocida y contenida en un tubo cilindrico cuya longitud sea recorrida en una fracción de segundo.”

El tubo empleado por Le Roux era de zinc encorvado sobre sí mismo en dos porciones iguales reunidas por un codo circular. Había extraído la humedad del aire, y mantenido su temperatura á 0° con hielo fundente contenido en una bañera que rodeaba al tubo por todas partes.

Producía la conmoción sonora con un solo golpe dado con un mazo de madera en una membrana de caucho sumamente estirada en uno de los extremos del tubo. Después de recorrer dicha conmoción toda la longitud de éste, ponía en movimiento la segunda membrana sujeta al otro extremo. El origen y el fin de la propagación sonora resultaban inscritos automáticamente por la electricidad, según hemos dicho (1).

De una serie de 77 experimentos hechos con la precisión que caracteriza los traba-

(1) Indiquemos el medio de que se valía Le Roux para anotar el tiempo y medir la duración de la propagación. El cronoscopio ideado por él era sobre manera ingenioso. Consistía en una regla dispuesta verticalmente en reposo, y luego abandonada libremente á la acción de la gravedad. Esta regla estaba recubierta en una parte á propósito de su superficie de una hoja de plata ó de metal plateado, previamente sometida á la acción del vapor de yodo. Mientras duraba la caída de la regla, descargaba el mazo un golpe en la membrana de partida, y en seguida tenía efecto la propagación de la onda y su llegada á la otra membrana situada en el extremo opuesto del tubo. Las chispas de inducción que brotaban en los precisos momentos del origen y fin de la conmoción dejaban sus huellas en dos puntos de la superficie yodada. La distancia entre ambos puntos permitía calcular el intervalo transcurrido entre dichos momentos, en virtud de la ley de la caída de los cuerpos, quedando así medida la duración del fenómeno.

jos de tan sabio físico, y discutidos rigurosamente, resulta que la velocidad del sonido á 0° y en el aire seco es de 330'66 metros. Le Roux supone que todas las causas de incertidumbre ó de error reunidas no pueden producir una diferencia de más de 20 centímetros en este resultado, número casi idéntico al que dieron en 1822 los experimentos de la Oficina de Longitudes.

Mientras Le Roux se ocupaba en medir la velocidad del sonido en condiciones perfectamente definidas y evitando todas las causas capaces de influir en esta velocidad y de modificarla, Regnault procuraba, por el contrario, variar de todos los modos posibles sus experimentos, á fin de determinar estas mismas influencias. A tenor de la reseña del sabio académico, daremos una idea de los principales resultados que obtuvo, con lo cual el lector tendrá un análisis completo de los trabajos efectuados acerca de este punto particular de la ciencia del sonido.

Cuando Newton, Lagrange y Eulero buscaron una fórmula que expresara la velocidad de las ondas sonoras, supusieron que el medio fluido, vehículo del sonido, era un gas *perfecto*, dotado de una elasticidad no alterada por los cuerpos ambientes; que los cambios dimanados de las variaciones de presión seguían rigurosamente la ley de Mariotte, y finalmente que las ondas sonoras se propagaban sin que mediara transporte alguno de las masas gaseosas. Hase visto que la cifra que representaba teóricamente la velocidad del sonido en estas hipótesis es notablemente inferior á la velocidad observada (casi $\frac{1}{6}$), y al pronto se creyó que la diferencia procedía de causas de error inherentes á los procedimientos de observación. Laplace halló en otra parte el motivo de dicha diferencia, haciendo ver que las condensaciones sucesivas del aire producían un desprendimiento de calor en el trayecto de las ondas, que por consiguiente aumentaba la elasticidad, y que la velocidad teórica del sonido era en realidad mucho mayor de lo que dedujeron Newton y sus sucesores. De aquí siguióse una fórmula más completa, más verdadera, pero calculada siempre en la hipótesis de que hubiera un gas perfecto.

Ahora bien: real y positivamente no existen estas condiciones de elasticidad perfecta de los gases. Sábese (y M. Regnault lo ha demostrado hace tiempo) que todos los gases se separan más ó menos de la ley de Mariotte; pues lo propio sucede respecto de las demás condiciones, conforme lo han probado los recientes experimentos del mismo sabio. Su fórmula difiere, pues, de la de Newton modificada por Laplace. Faltaba comprobar, mediante experimentos preparados de un modo conveniente, la influencia de cada una de estas infracciones de la antigua hipótesis teórica sobre la velocidad real de las ondas sonoras.

M. Regnault se ha ocupado ante todo del estudio de la propagación del sonido en tubos cilíndricos rectilíneos.

Según la fórmula de Laplace, la velocidad del sonido es independiente de la intensidad, pero la fórmula más completa dada por Regnault indica lo contrario; según ésta, la velocidad es tanto mayor cuanto más considerable la intensidad. Admitíase además que la intensidad debía ser indefinidamente la misma en un tubo cilíndrico rectilíneo; pero los experimentos de Regnault prueban que no hay nada de esto; que aquélla va debilitándose de un modo continuo y tanto más cuanto menor es el diámetro del tubo, lo que atribuye aquél principalmente á la reacción de sus paredes elásticas (1). En

(1) Acerca de este punto dice Regnault que en el trayecto de la onda sonora por el interior de la alcantarilla de San Miguel se oía *por la parte de fuera* un sonido muy fuerte en el momento de pasar la onda, cualquiera que fuese el punto de la línea en que se situase el observador. “Así pues, añade, se consume exteriormente una porción notable de la fuerza viva.”

efecto, una pistola cargada con un gramo de pólvora produce una detonación que no la percibe ya el oído cuando ha recorrido

1150 metros en un tubo de 108 milímetros de diámetro				
3810	—	—	300	—
9540	—	—	1100	—

Esto prueba á la vez que la intensidad no es constante, y que la extinción del sonido es mayor en los tubos de reducido diámetro. Tampoco la velocidad del sonido es la misma en ellos. Reducida á 0° y en el aire seco, varía:

De 330^m,99 á 327^m,52 en los trayectos recorridos de 566^m,7 á 2833^m,7, siendo la carga de pólvora de 3 decigramos;

De 329^m,95 á 326^m,77 en los trayectos de 1351^m,95 á 4055^m,85, siendo la carga de 4 decigramos.

Estas velocidades son relativas á la propagación de la onda sonora en el tubo más pequeño, de 108^{mm} de diámetro.

He aquí ahora las velocidades igualmente variables en los otros dos tubos, según la longitud de los trayectos recorridos:

Tubo de 300 milímetros.	de 332 ^m ,37 á 330 ^m ,34	en trayectos de 1905 ^m á 3810 ^m
	de 330 ^m ,43 á 328 ^m ,96	— 7620 ^m á 15240 ^m
Tubo de 1100 milímetros.	de 334 ^m ,46 á 331 ^m ,24	— 749 ^m á 5672 ^m
	de 330 ^m ,87 á 330 ^m ,52	— 8508 ^m á 19851 ^m

Cuanto más cerca del punto de partida se toman las velocidades, mayores son; pero las cifras anteriores demuestran también la influencia del diámetro de los tubos (1). Regnault cree que la acción de las paredes en la propagación del sonido era ya muy escasa en los tubos de mayor diámetro, verbigracia de 1^m,10. Opina que en este caso se puede considerar dicha influencia como nula, y que entonces la velocidad es casi la del sonido al aire libre. Así pues, de sus numerosos experimentos deduce lo siguiente:

“Que la velocidad media de propagación, en el aire seco y á 0°, de una onda producida por un pistoletazo y contada desde la boca del arma hasta el momento en que se debilita de tal modo que ni siquiera agita las membranas más sensibles, es de 330^m,6.”

Como se ve, este número es casi idéntico al deducido por Le Roux, y por lo tanto se le puede tener por exacto, con tanto mayor motivo cuanto que de los muchos experimentos hechos en la meseta de Satory (1862 á 1866) por Regnault, con arreglo al método de los disparos de cañón recíprocos, resultan 330^m,7 en un trayecto total de 2445 metros. Agreguemos que el ilustrado físico ha comprobado directamente la ley según la cual la velocidad del sonido es independiente de la presión.

Los experimentos de Regnault han hecho ver que la velocidad del sonido, por lo menos en las columnas gaseosas limitadas por cilindros de reducido diámetro, no es independiente de la intensidad de la onda sonora. Mas, al parecer, ninguna otra cualidad del sonido como su altura ó tono, su mayor ó menor gravedad ó agudeza, tiene influjo alguno en esta velocidad. Es un experimento que cualquiera puede hacer, escuchando

(1) “Es probable, añade, que la naturaleza de la pared y su pulimento más ó menos perfecto influyan en este fenómeno. En prueba de ello citaré un caso; en las cloacas de gran sección de París, se suele avisar á los obreros tocando una trompeta, y se ha reconocido que estas señales resuenan muchísimo más lejos en las galerías cuyas paredes están cubiertas de un cemento bien liso que en las que lo están de simple argamasa.”

á lo lejos una tocata, un canto musical, y mejor aún un concierto de instrumentos ó de voces. En esta circunstancia, los sonidos están enlazados entre sí por relaciones rigurosamente constantes, en la melodía por el ritmo y el compás, en la armonía por su concomitancia.

Pues bien, la experiencia prueba que la audición á mayor ó menor distancia no altera ni las melodías ni los acordes, lo cual sucedería forzosamente si los sonidos se propagaran con distinta velocidad, variable con la altura. Biot comprobó este hecho en una distancia de más de un kilómetro, al practicar sus experimentos sobre la velocidad del sonido en el hierro fundido, según hemos indicado ya.

“Para saber, dice, si los sonidos graves ó agudos, fuertes ó flojos, se propagaban con la misma velocidad, ó si por este concepto había alguna diferencia entre ellos, hice que se tocara la flauta junto á uno de los extremos del tubo. Sábese que por lo común todo canto musical está sujeto á cierto compás que regula exactamente el intervalo de los sonidos sucesivos. Por consiguiente, si algunos de éstos se hubieran propagado más de prisa ó más despacio que los otros, al llegar á mi oído se habrían confundido con los que les precedían ó seguían en el orden del canto, y la tocata oída de este modo habría parecido enteramente alterada. Pero, en lugar de suceder así, era perfectamente regular y conforme con su compás natural; de donde resulta que todos los sonidos se propagan con igual velocidad. Los individuos de la Academia de Ciencias habían hecho ya esta observación en 1738; pero ignoro de qué medios se valieron.”

Regnault ha comprobado también un fenómeno que no tuvieron en cuenta los físicos que midieron antes que él la velocidad del sonido en el aire. Nos referimos á cierto movimiento de transporte de las capas aéreas, que aumenta la rapidez de propagación. “A consecuencia de este transporte, dice, y de su gran intensidad, la onda debe andar más de prisa en las primeras partes del trayecto que en las siguientes, sobre todo siguiendo la línea de tiro. Pero esta aceleración se aminora muy pronto y llega á ser casi imperceptible cuando la onda recorre grandes distancias.”

Biot ha observado este movimiento de transporte, pero no al aire libre, cuando hizo los experimentos más arriba mencionados. “Algunos pistoletazos disparados junto á uno de los extremos de la columna cilíndrica en la cual hacía yo mis experimentos producían en el otro un estampido considerable, cuando llegaba á él la conmoción sonora. El aire era expulsado del último tubo con suficiente fuerza para producir en la mano un viento impetuoso, para despedir á más de medio metro de distancia los cuerpos ligeros que se habían situado en su dirección, y para apagar bujías encendidas, aunque se estuviera á 951 metros de distancia del punto donde se había hecho el disparo dos segundos y medio antes.”

La velocidad del sonido en gases distintos del aire se calcula teóricamente, en virtud de una ley muy sencilla, que no podemos mencionar aquí. Se la mide también prácticamente por el método llamado de las vibraciones, empleando al efecto tubos sonoros. He aquí algunos resultados obtenidos de este modo por M. Wertheim:

Gases	Velocidad del sonido á 0°
Aire.	333 metros
Acido carbónico.	262 —
Oxígeno.	317 —
Hidrógeno.	1270 —
Oxido de carbono.	337 —
Amoniaco.	407 —

Regnault ha podido medir directamente la velocidad del sonido en algunos gases, de los que llenaba dos conductos, uno de 567^m,4 y otro de 70^m,5 de longitud. De este modo ha deducido 1257 metros como velocidad en el hidrógeno, velocidad que equivale á 3,8 veces la del sonido en el aire, 279 metros en el ácido carbónico y 406 en el amoníaco.

V

MEDIDA DE LAS DISTANCIAS POR LA VELOCIDAD DEL SONIDO EN EL AIRE

Demos, pues, por admitido que el número 330^m,6 representa la velocidad del sonido en el aire libre y seco, á 0°, y deduzcamos de él los valores aproximados de esta velocidad á temperaturas diferentes sobre y bajo cero. Ya se ha visto que para pasar de un grado á otro, sobre ó bajo, basta añadir ó deducir de la velocidad el número sensiblemente constante 0^m,626. He aquí el cuadro que resulta:

VELOCIDAD DEL SONIDO AL AIRE LIBRE

Temperaturas en grados centígrados	Velocidad por segundos en metros	Temperaturas en grados centígrados	Velocidad por segundos en metros	Temperaturas en grados centígrados	Velocidad por segundos en metros
- 20°	318,10	+ 2°	331,86	+ 20°	343,20
- 15	321,25	+ 3	332,49	+ 21	343,83
- 14	321,88	+ 4	333,12	+ 22	344,46
- 13	322,41	+ 5	333,75	+ 23	345,09
- 12	323,04	+ 6	334,38	+ 24	345,72
- 11	323,67	+ 7	335,01	+ 25	346,35
- 10	324,30	+ 8	335,64	+ 26	346,98
- 9	324,93	+ 9	336,27	+ 27	347,61
- 8	325,56	+ 10	336,90	+ 28	348,24
- 7	326,19	+ 11	337,53	+ 29	348,87
- 6	326,82	+ 12	338,16	+ 30	349,50
- 5	327,45	+ 13	338,79	+ 31	350,13
- 4	327,08	+ 14	339,42	+ 32	350,76
- 3	328,71	+ 15	340,05	+ 33	351,39
- 2	329,34	+ 16	340,68	+ 34	352,02
- 1	329,97	+ 17	341,31	+ 35	352,65
0	330,60	+ 18	341,94	+ 40	355,80
+ 1	331,23	+ 19	342,57	+ 50	362,10

El conocimiento de estos números puede servir para medir rápidamente, con cierta aproximación, la distancia entre dos puntos, cuando ningún obstáculo estorba la vista en el espacio que los separa.

Vese por ejemplo en el campo y en lontananza un cazador que dispara su escopeta. Si, teniendo un reloj de segundos, se cuenta el tiempo transcurrido desde que se divisa el fogonazo hasta que se oye la detonación, bastará una simple multiplicación para conocer la distancia que media entre el observador y el cazador. Pero también es preciso ir provisto de un termómetro para conocer la temperatura. En rigor sería menester que el cazador lo tuviese asimismo, y aun sería preferible que pudiera además observar y oír un disparo hecho por el observador. A falta de todos estos recursos de los que se puede carecer en parte, se procede por cálculo aproximado. Los marinos, los viajeros y los militares en campaña pueden sacar un partido muy útil de esta manera tan expedita de medir las distancias.

M. Radau da en su obra *La Acústica* los detalles siguientes sobre el uso que M. Abbadie ha hecho de este método durante su larga permanencia en Etiopía:

“En la isla de Mocawa se dispara todos los días, á la puesta del sol y mientras dura el Ramadán ó mes de abstinencia de los musulmanes, un cañonazo que anuncia la terminación del ayuno. M. Abbadie se aprovechó de él para calcular el tiempo que transcurría entre el fogonazo y la llegada del sonido á la orilla opuesta. Situóse al efecto en una colina inmediata al pueblo de Omkullu, y allí aguardó el cañonazo del fuerte Mudir. Oyó el estampido á los 18 segundos de haber visto el fogonazo, y por lo tanto la distancia era de 6440 metros (1).”

En otra ocasión midió M. Abbadie, valiéndose del mismo método, la distancia que hay desde la ciudad de Adua hasta el monte Saloda. He aquí los detalles que Arnaldo de Abbadie da, con fecha 15 de agosto de 1840, acerca de esta aplicación particular de la física á la geodesia:

“Hoy hemos hecho algunos experimentos para medir, valiéndonos de la velocidad del sonido, la distancia que hay entre la cumbre del monte Saloda, inmediato á esta ciudad (Adua) y el tejado de la casa de Aya Tasfa, en la parroquia de Maihane Alam, donde está alojado actualmente el prefecto de la misión católica de Etiopía. Mi hermano, situado en la cima del monte y junto á una cresta de roca saliente, hacía disparos con un fusil de mecha: yo por mi parte disparaba con una escopeta. Unas tunicas blancas colgadas nos servían de señales. Yo llevaba el cronómetro de puntura, mi hermano el cronómetro G, cuyos golpes contaba. Nuestros disparos se oían muy bien; los de mi hermano con alguna debilidad, aunque distintos. Es de notar que mientras el viento soplabá oblicuamente hacia la montaña, mi hermano percibía el sonido con más lentitud que yo. Inmediatamente después de los seis disparos, observamos los termómetros seco y húmedo.” El resultado fué que la distancia que se trataba de averiguar equivalía á 3 kilómetros.

Nos permitimos recomendar un medio tan rápido y cómodo de medir distancias á los oficiales del ejército. Aun sin termómetro ni reloj de segundos se puede conseguir con bastante aproximación. No cabe duda de que el fogonazo que sale de la boca de un arma de fuego se ve mal de día cuando el cielo está despejado; pero por poco nublado que esté, ó al hacerse ya de noche, el resplandor de aquél es visible, y además, á falta de fogonazo, se puede observar el humo. Presentemos un ejemplo: Una batería enemiga dispara un cañonazo, mediando entre el fogonazo y el estampido 15 segundos poco más ó menos: el oficial que observa calcula que la temperatura está á 12°. La distancia resultará ser de 338×15 , ó sean 5070 metros. Supongamos que la temperatura marcada en este momento por un termómetro fuese en realidad de 10°, y que un reloj de segundos marcara 14°5; la distancia efectiva sería de $336 \text{ metros} \times 14,5$, es decir, 4885 metros. El error cometido llegaría á 185 metros, ó casi $\frac{1}{26}$ de la distancia verdadera, inexactitud pasadera en tales circunstancias.

Por lo demás se ve que el error más considerable en que se puede incurrir es el que procede de la apreciación de la temperatura; pero un reloj de segundos y un termómetro de bolsillo no son objetos tan raros que su falta impida el hacer uso del método precedente con ciertos visos de exactitud.

Del propio modo se puede medir la distancia á que se halla de nosotros una nube de tormenta, de la cual vemos brotar relámpagos seguidos de truenos. Sábese que el

(1) Esto supone una temperatura de 43° centígrados, en cuyo caso la velocidad del sonido es de 357^m,7 por segundo. Falta saber si la influencia del viento exigía además que se corrigiese este cálculo.

instante en que se ve el surco luminoso, en que estalla la gigantesca chispa, es también el del estampido del trueno. Pues bien, contando el número de segundos que transcurren entre el relámpago y el instante en que percibimos la detonación, y multiplicando este número por la velocidad del sonido (340 á 350 metros para las temperaturas comprendidas entre 15° y 30°), se tendrá la distancia que separa á la nube de la Tierra. Cuando cae un rayo á corta distancia del espectador, el fragor del trueno sigue casi instantáneamente al relámpago; aquel á quien el rayo hiriese no tendría tiempo de distinguir el uno del otro, de lo cual resulta que el *relámpago visto* no es peligroso, y las personas asustadizas pueden tranquilizarse al ver la chispa, y aguardar sin zozobra el estampido del trueno. Verdad es que esto no basta para animarlas contra los rayos futuros.



Fig. 251.—Medida de la velocidad del sonido en el agua. Estación de partida

Por término medio hay que contar de 2 á 3 segundos por cada kilómetro de distancia; 28 ó 29 segundos corresponderán, pues, á un miriámetro ó sean dos leguas y media.

De la diferencia que existe entre las velocidades de la luz, del sonido y de los proyectiles resultan consecuencias singulares. Por ejemplo, el soldado herido por una bala de cañón puede ver el fogonazo de la pieza, pero no oír la detonación, pues la velocidad del sonido es menor que la de la bala; y si ésta procede de larga distancia, como la resistencia del aire disminuye cada vez más la velocidad del proyectil, puede suceder que vea la luz y oiga la detonación antes de ser herido.

“Si un piquete de soldados formados en círculo, dice Tyndall, disparan sus fusiles á la vez, todas las descargas le parecerán una sola á la persona situada en el centro. Pero si aquéllos están formados en línea recta, un observador colocado en la misma línea, más allá de uno de los extremos de la fila, oirá, en lugar de un solo sonido, un redoble más ó menos prolongado. Del propio modo, la descarga del rayo en los diferentes puntos de una nube de gran longitud puede producir el fragor prolongado del trueno. Una

larga fila de soldados que marcha con la banda de música á la cabeza por una gran carretera, no puede llevar el paso por igual, porque las notas musicales no llegan simultáneamente al oído de los soldados situados á vanguardia y á retaguardia.” (*El Sonido.*)

VI

VELOCIDAD DEL SONIDO EN LOS LÍQUIDOS

Hemos visto que el sonido se propaga en el agua y, por lo general, en los líquidos lo propio que en el aire; pero la rapidez de propagación es en ellos mucho mayor. La-

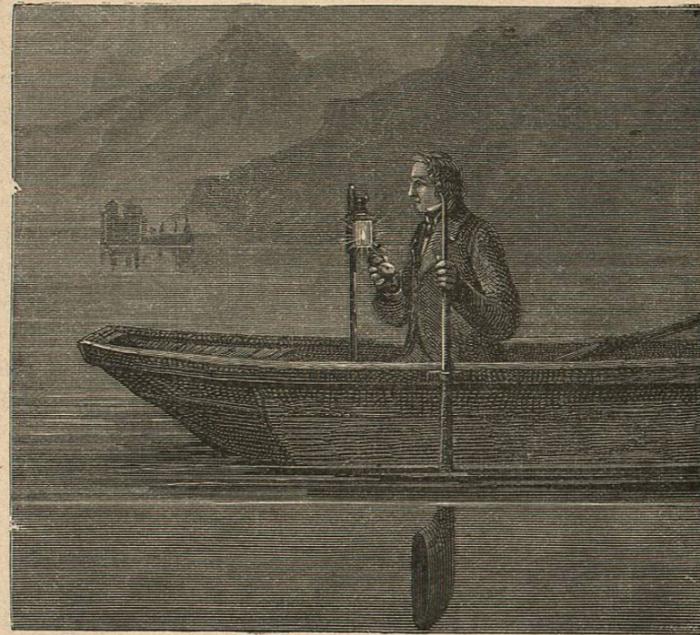


Fig. 252.—Medida de la velocidad del sonido en el agua. Estación de llegada

place ha averiguado teóricamente el valor de esta rapidez, valor que depende de la densidad del líquido así como de su compresibilidad. En su concepto, la velocidad del sonido en el agua de lluvia debe de ser $4\frac{1}{2}$ veces, y en la de mar $4\frac{7}{10}$ igual á la del sonido en el aire.

Beudant hizo en Marsella los primeros experimentos relativos á este asunto, valiéndose de un procedimiento por el estilo del que sirvió para medir la velocidad del sonido en el aire. Dos embarcaciones del puerto, cuya distancia entre sí se había medido de antemano, sirvieron de estaciones extremas, y una campana sumergida junto á una de aquéllas, á la que se daba de vez en cuando un golpe á una señal convenida, producía el sonido que un buzo escuchaba en la otra estación. Beudant dedujo 1500 como velocidad de propagación en un segundo. Este número no difiere mucho del que resultaría de la fórmula teórica de Laplace.

Lleguemos ahora á los experimentos que los físicos franceses Colladon y Sturm hicieron en 1827 en el lago de Ginebra.