

SUR LES PROPRIÉTÉS THERMOMAGNÉTIQUES DE L'EAU

PAR

A. W. MARKE¹.

Ces dernières années ont vu paraître un grand nombre de recherches expérimentales concernant les propriétés des corps paramagnétiques et diamagnétiques. Ce qui les a provoquées, ce sont surtout les essais faits par LANGEVIN, WEISS, KAMERLINGH ONNES et d'autres, en vue d'appliquer la théorie des électrons à l'explication des phénomènes magnétiques. Les hypothèses qu'on a émises à ce sujet établissent certaines relations: la loi de CURIE, la règle selon laquelle le diamagnétisme est indépendant de la température, la règle du nombre des Magnétons, etc., et l'on a cherché par la voie expérimentale à vérifier l'exactitude des propositions ainsi formulées.

C'est l'eau distillée qui a fait l'objet des investigations les plus approfondies, et cela s'explique. En fait, l'eau est le dissolvant le plus généralement utilisé et, conséquemment, la manière dont elle se comporte au point de vue magnétique acquiert une importance considérable presque toutes les fois qu'il s'agit de recherches portant sur des solutions de sels. En outre, l'expérience a fait voir que, en règle générale, il est plus facile d'effectuer des mesures relatives que des

¹ Conférence faite au XVI^{ème} Congrès des naturalistes scandinaves, tenu à Christiania en juillet 1916.

mesures absolues, et le plus souvent on a choisi l'eau distillée comme corps de comparaison.

Or, ce dernier fait a donné lieu à un inconvénient: c'est qu'il faut modifier la valeur absolue des coefficients d'aiman-

Tabl. 1

Les valeurs les plus importantes, anciennes et nouvelles, du coefficient d'aimantation de l'eau¹⁾.

An	Auteur	Température	Coefficient d'aimantation	Coefficient de température
1885	QUINCKE.....	20° C.	— 0,80.10 ⁻⁶	
1888	DU BOIS.....	22°	0,83	— 0,0025
1892	S. HENRICHSEN.....		0,72	
1895	P. CURIE.....		0,79	0
1896	TOWNSEND.....	10°	0,74	
1898	FLEMING & DEWAR....	20°	0,74	
1898	J. KOENIGSBERGER....	20°	0,78	
1899	JÄGER & ST. MEYER...	13°	0,64	— 0,00164
1902	PIAGESSI.....	23°	0,78	— 0,00175
1903	STEARNS.....	22°	0,705	
1905	O. SCARPA.....	22°	0,77	
1905	WILLS.....	22°	0,695	
1911	P. SÉVE ²⁾	24°	0,720	
1912	A. PICCARD ³⁾	20°	0,719	+ 0,00012
1913	DE HAAS & DRAPIER ⁴⁾ .	21°	0,721	
1914	H. C. HAYES ⁵⁾	24°	0,726	

¹⁾ La première partie de ce tableau est empruntée principalement au Recueil de constantes physiques par Abraham & Sacerdote, Paris 1912.

²⁾ P. SÉVE: Mesure du coefficient d'aimantation de l'eau, Thèses. Paris 1912. — Journ. de Phys. V^e sér., t. 3, p. 8. 1913.

³⁾ A. PICCARD: Die Magnetisierungskoeffizienten des Wassers und des Sauerstoffs. Basel 1913. — C. R., t. 155, p. 1497. 1912. Arch. Sc. phys. et nat., t. 35, p. 211, 344, 458. 1913.

⁴⁾ DE HAAS & DRAPIER: Ann. d. Phys., Bd. 42, p. 673. 1913.

⁵⁾ H. C. HAYES: Phys. Rev. v. 3, p. 295. 1914.

tation¹ ainsi trouvés, au fur et à mesure qu'on arrive à connaître plus exactement celle de l'eau. Comme il ressort du tabl. 1, les mesures anciennes ont donné des valeurs

¹ Le coefficient d'aimantation χ est rapporté à l'unité de masse, mais la susceptibilité $\alpha = \frac{I}{H}$ à l'unité de volume; on a alors $\alpha = \chi \cdot d$, où d est la densité du corps dont il s'agit.

très divergentes de cette constante. C'est seulement dans ces quatre ou cinq dernières années que différents expérimentateurs, employant des méthodes assez diverses, sont parvenus à trouver des valeurs suffisamment concordantes pour qu'on puisse maintenant, avec une certaine sûreté, admettre que le coefficient d'aimantation de l'eau à la température de 20 degrés centigrades est de $-(0.720 \pm 0.001) \cdot 10^{-6}$. Il est vrai que H. C. HAYES est arrivé à une valeur qui s'écarte notablement de celle-là; mais la méthode qu'il a employée, savoir celle de la balance de torsion, présente, au point de vue d'une détermination absolue, des difficultés si considérables qu'on ne pouvait guère s'attendre à obtenir un meilleur accord.

Par contre, en ce qui concerne l'influence exercée sur le coefficient par la température, l'inspection de ce même tabl. 1 fera voir qu'elle ne peut guère être considérée comme étant connue avec une certitude suffisante.

Tandis que pour CURIE le coefficient était indépendant de la température — ce qui s'accorde certainement avec le degré d'exactitude de ses mesures —, les autres expérimentateurs relativement anciens, de leur côté, ont trouvé un coefficient de température négatif de l'ordre de grandeur 0.002. Au contraire, PICCARD est arrivé à un nombre positif et numériquement beaucoup plus petit, et ses mesures ont pourtant été effectuées avec un soin et une exactitude qui inspirent la plus grande confiance.

A l'heure actuelle, les recherches ont généralement pour but de déterminer jusqu'à quel point la susceptibilité dépend de la température, parce qu'on peut ainsi obtenir un aperçu des constantes les plus importantes aux théories en question — constante de CURIE, champ moléculaire etc. — en dressant une courbe représentant des valeurs parallèles de la température et du coefficient d'aimantation. Dès lors, il importe de savoir, quel est pour l'eau distillée le coefficient de

température en question. Quant à ceux établis jusqu'ici, ils présentent entre eux des discordances regrettables.

Les considérations qui précèdent m'ont amené à tenter une solution du problème qui nous occupe, en entreprenant une nouvelle détermination du coefficient de température à l'aide d'une balance de torsion construite d'après des principes indiqués par M. le Professeur P. WEISS et que j'ai eu l'occasion d'étudier lors d'un séjour à Zurich.

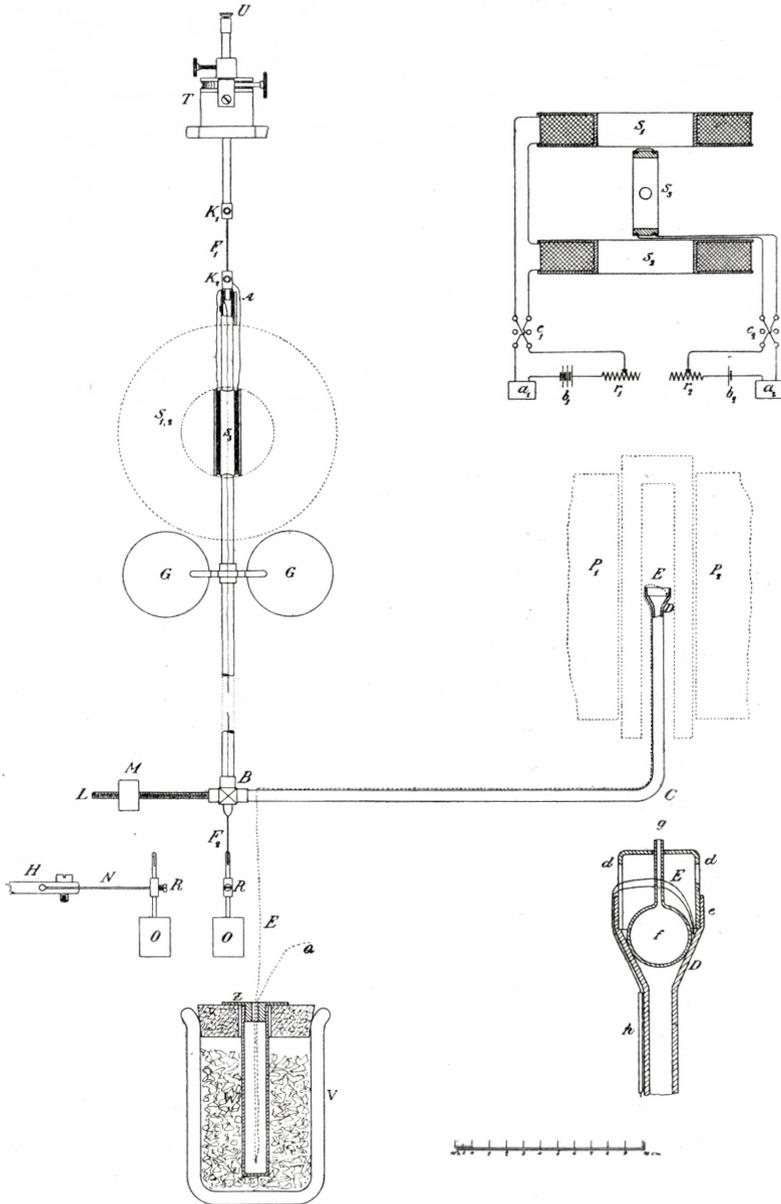
La partie mobile de cette balance de torsion est constituée par la pièce angulaire $ABCD$ (figure 1), dont la branche CD se trouve entre les pôles P_1 et P_2 d'un électro-aimant refroidi à l'eau¹. AB est un tube de verre, BCD un tube en quartz, attachés l'un et l'autre avec de la cire d'Espagne à la pièce d'aluminium BL munie du contre-poids mobile M . Ce système est porté par un lien de bronze phosphoré F_1 qui au moyen de la pince K_1 est attaché à la tête de torsion T . En bas, le système est dirigé par le lien de bronze phosphoré F_2 , qui est soudé au poids O , ainsi que par le ressort plat N (voir la petite figure à gauche, qu'il faut se représenter tournée de 90° par rapport à la figure principale). Ce ressort a pour but d'amortir les oscillations, tandis que la tension des liens F_1 et F_2 est déterminée surtout par O . $G-G$ sont deux feuilles de mica servant à l'amortissement.

La forme des pièces polaires P_1 et P_2 a été choisie telle que le champ magnétique devient non-homogène. La force K par laquelle ce champ agira sur 1 cm^3 de la préparation placée sur D , se trouvera donc déterminée par l'équation

$$K = x \cdot H \cdot \frac{dH}{dx}$$

où $x = \frac{I}{H}$ signifie la susceptibilité, H l'intensité, et x une

¹ C'est grâce à l'extrême obligeance du Laboratoire de télégraphie et téléphonie de l'École polytechnique de Copenhague que cet électro-aimant a été mis à ma disposition pour mes expériences.



étendue dans la direction de la force, qui est ici perpendiculaire à BC . Cette force aura pour effet de tourner la balance de torsion, et, si la préparation se trouve toujours au même endroit du champ, la force sera proportionnelle à z . Il s'agit donc de se procurer une mesure de cette force K , ou bien — au cas que K s'attaque toujours à la balance de torsion à une même distance de l'axe de rotation — une mesure du moment par lequel K cherche à tourner la balance.

En utilisant la balance de torsion, on a en général procédé de l'une ou de l'autre des deux manières suivantes: ou bien on s'est arrangé de façon à mesurer le déplacement directement soit au moyen du microscope, soit à l'aide d'un miroir; ou bien, en tournant la tête de torsion T , on a ramené l'appareil à zéro, pour mesurer ensuite l'angle de torsion. Sur la proposition le M. WEISS, j'ai cherché à atteindre un plus haut degré de précision en apportant à ce dernier procédé des modifications telles que l'effet du champ magnétique soit compensé par l'action réciproque de deux bobines parcourues par des courants électriques: Au tube de verre AB j'attache la bobine d'ivoire S_3 portant cent tours de fil de cuivre épais de $0^{\text{mm}}.2$ et isolé à l'émail. En ce qui concerne les fils conducteurs, l'un d'eux va à la pince K_2 et de là par F_1 , K_1 et U , tandis que l'autre passe par l'intérieur du tube AB jusqu'au lien F_2 et au ressort plat. De l'un et l'autre côté de S_3 est aménagée une bobine stationnaire, S_1 et S_2 , qui sont réunies en série. Le diagramme des courants de ces trois bobines, ainsi que la position que celles-ci occupent l'une vis-à-vis de l'autre, sont représentés par la petite figure en haut, à droite, où a_1 et a_2 constituent un milliampèremètre (résistance 10Ω) commun au deux circuits, tandis que r figure des résistances à régler, b_1 et b_2 des batteries d'accumulateurs. Enfin, dans chaque circuit est inséré un inverseur.

La position de la balance de torsion dans la direction BC était contrôlée à l'aide d'un microscope visant à une marque qui se trouvait à la partie antérieure de la pièce d'aluminium (B). Le tube R avait été une fois pour toutes placée verticalement sous la pince K_1 . Des écarts d'avec la position verticale de AB étaient rectifiés en déplaçant le contre-poids M . Etant donné l'insignifiance des changements de poids à D , ces écarts étaient très minimes.

Les déplacements de la balance dans la direction perpendiculaire à BC sont observés à l'aide d'un miroir. Au moyen d'une lentille achromatique, il se formait sur une échelle en verre l'image d'un fil de platine épais de $0^{\text{mm}}.01$, la lumière étant réfléctée, entre ce fil et la lentille, par un miroir plan placé sur le tube de verre, près de A . La distance qui sépare le miroir de l'échelle est de 4 m. — L'index peut être ajusté avec une exactitude de $0^{\text{mm}}.2$, ce qui veut dire qu'on peut ajuster la préparation chaque fois, à $0^{\text{mm}}.007$ près, au même point du champ magnétique.

Afin d'assurer à la préparation toujours la même place sur la balance de torsion, de façon à ce que le bras de celui-ci ait toujours la même longueur, le bout libre — D — du tuyau de quartz était façonné comme un entonnoir, à l'extrémité supérieure, polie, duquel était soudé un petit tube e , en quartz, destiné à former un support solide pour une cloche d , également en quartz. Comme récipient de la préparation on se sert d'un ballon de quartz de forme sphérique f , pourvu d'un col g . Ce ballon trouvera sa place assurée dans l'entonnoir et, pour l'empêcher d'être renversé, on fait passer le col g par un trou pratiqué au centre de la partie supérieure de la cloche d . Dans celle-ci on a, en outre, aménagé des perforations pour l'élément thermique ainsi que pour la circulation de l'air.

La distance entre les pièces polaires était telle que le tube CD , portant la préparation, pouvait être entouré soit

d'un four électrique, soit d'un réservoir contenant un mélange frigorifique, ainsi que cela est esquissé par des traits pointillés dans la figure 1. Ce réservoir ainsi que le four étaient munis, à l'intérieur, d'un revêtement de cuivre destiné à rendre la température aussi uniforme que possible. Afin d'éviter toute attraction ou répulsion électrostatiques entre le cuivre et le quartz, il a fallu mettre celui-là à la terre. Des essais préalables avaient permis de constater que dans toute la région considérée la température ne variait autour la préparation que d'environ $0^{\circ},1$ au plus. Lorsqu'on opérail à des températures inférieures à celle de la chambre, on faisait continuellement passer de l'air sec dans le réservoir afin d'éviter la condensation de vapeurs d'eau sur le bras de la balance de torsion.

Pour mesurer la température, je me sers d'un élément thermique en constantan-argent. Je tenais à appliquer la soudure aussi près du ballon que possible. A cet effet, j'ai conduit l'élément de D à B par des tubes étroits de quartz h attachés avec des fils de platine au tube BCD . Les soudures froides doivent avoir la température de 0° ; cependant cela ne pouvait pas se faire de la manière habituelle parce que les fils assez épais de l'élément opposaient une trop forte résistance à la torsion et produisaient en outre un effet ultérieur élastique. C'est pourquoi j'ai recouru à la manière de procéder indiquée dans la fig. 1 (en bas): Les soudures froides descendaient librement dans un tube cylindrique W noirci à l'intérieur et fermé en bas. Le tube W fut placé dans un récipient Dewar V rempli de glace, et — pour le protéger autant que possible contre la chaleur provenant de l'air ambiant — le tube était muni d'un couvercle en ébonite Z perforé au centre. Les parties des fils qui descendaient dans le tube W étaient entourées de tubes de verre très étroits, qui étaient attachés les uns aux autres avec de la cire de façon à former un ensemble con-

tinu. J'avais vérifié au préalable qu'à l'intérieur du tube *W* la température s'abaissait à zéro en deux ou trois minutes. Les fils de l'élément étaient soudés à des fils de cuivre très minces qui conduisaient à un appareil de compensation; ainsi, l'élément thermique n'était que par ces fils très minces en rapport avec des points fixes. Le dispositif que je viens de décrire s'est montré être parfaitement satisfaisant. — Comme il a été dit ci-dessus, la température régnant autour de la préparation était partout la même. Ainsi qu'on peut s'en rendre compte par l'examen de la fig. 1, une partie relativement longue de l'élément thermique — 2 cm. environ — se trouvait dans le voisinage immédiat de la préparation, de sorte qu'on peut compter que l'élément thermique indiquait bien réellement la température de celle-ci.

L'intensité du champ employé était d'environ 3000 Gauss, des essais préalables ayant établi que le champ avait, avec un degré de précision pleinement satisfaisant, la même intensité chaque fois qu'on fermait le courant parcourant les tours de l'aimant.

Comme la balance de torsion se montra être assez fortement diamagnétique, on eut soin de garnir l'intérieur du tube *CD* de fil d'aluminium paramagnétique en quantité telle que, le ballon *f* étant vide, la balance de torsion ne fût que très faiblement diamagnétique à la température de la chambre. —

Pour effectuer les mesures au moyen de cet appareil, on procède comme il suit (comparez le tabl. 2, qui montre une série de mesures faites sur un ballon vide):

Le courant de S_3 est maintenu constant. A l'aide du courant α_1 , qui parcourt S_1 et S_2 , la balance de torsion est amenée — sans que l'aimant soit parcouru par un courant — à occuper une certaine position, celle de zéro. Puis on inverse les courants des deux groupes de bobines S_1 pour ramener alors — au moyen du courant α_2 — la balance à

zéro. Cela fait, on envoie le courant à travers les tours de l'aimant, et l'on répète ce procédé, en invertissant les courants encore ici, de façon à obtenir les deux courants β_1 et β_2 . Grâce à cette inversion, on parvient à éliminer les fautes pouvant provenir de l'action tournante exercée directement par le champ sur la bobine S_3 et, partant, sur la balance de torsion. La quantité $\beta_1 + \beta_2 - (\alpha_1 + \alpha_2)$ donnera alors la mesure de l'effet exercé par l'aimant sur la balance. Ceci n'est pourtant certain que si cette dernière maintient absolument constante sa position de zéro, et que l'action de l'aimant soit indépendante de la direction du champ. Or, la première de ces deux conditions ne se trouve remplie que très rarement, et la seconde ne l'est jamais parce que l'intensité du champ n'est pas tout à fait la même pour les deux directions dans lesquelles les tours sont parcourus par le courant. Il devient donc nécessaire de déterminer, pour la direction de champ opposée, α_1' et α_2' , puis β_1' et β_2' , et enfin α_1'' et α_2'' . A partir de toutes ces observations, on trouve par la méthode habituelle l'effet de l'aimant comme la moyenne de ceux constatés pour les deux directions du champ. — La température de D fut mesurée avant et après cette série de mesures, et en dressant les courbes j'ai employé la température moyenne. Au cours du mesurage, la température variait rarement plus de $1/5^\circ$. La grande différence que le tableau montre entre les valeurs de β_1 et de β_2 , est due à l'action directe exercée par le champ sur la bobine S_3 .

Le tabl. 2 comprend toutes les observations se rattachant à une série de mesures faites sur le ballon vide. Les cinq premières colonnes renferment les courants α et β mesurés comme indiqué plus haut, ainsi que le calcul de $\beta - \alpha$; la colonne 6 donne les températures lues sur l'appareil de compensation avant et après les mesures des courants. Enfin, les deux dernières colonnes contiennent les valeurs parallèles de la température et du courant, déterminées par ces mesures.

Tabl. 2.
Mesures sur ballon vide.

a_1	a_2	$a_1 + a_2$	$\beta_1 + \beta_2$ $-(a_1 + a_2)$	$\beta_1 + \beta_2$	β_1	β_2	T	Valeurs parallèles	
								de la Temp. C.°	du courant
30.70	29.90	60.60	7.80	69.65	45.25	24.40	0.207	— 5° 35	8.45
32.10	31.00	63.10	9.10	72.45	24.25	48.20			
32.35	31.20	63.55					0.221		
33.05	31.75	64.80	15.15	79.75	50.40	29.55	0.113	+ 3° 10	15.95
33.05	31.80	64.85	16.75	81.70	29.05	52.65			
33.25	31.80	65.05					0.133		
33.40	31.85	65.25	19.35	84.80	52.80	32.00	0.316	8° 05	20.60
33.45	32.20	65.65	21.90	87.60	31.75	55.85			
33.55	32.25	65.80					0.328		
43.30	42.15	85.45	26.75	112.55	66.70	45.85	0.635	15° 95	26.75
43.65	42.50	86.15	26.70	112.85	44.70	68.15			
43.85	42.30	86.15					0.637		
43.20	42.05	85.25	26.05	111.15	66.00	45.15	0.645		
43.05	41.90	84.95	27.45	112.20	44.15	68.05			
42.95	41.55	84.90					0.653		
34.05	32.45	66.50	37.00	102.95	62.15	40.80	1.208	29° 50	37.65
33.30	32.10	65.40	38.80	103.60	39.95	63.65			
32.95	31.30	64.25					1.214		
36.40	35.25	71.65	37.00	108.75	64.85	43.90	1.191		
36.55	35.30	71.85	37.85	109.80	42.90	66.90			
36.65	35.40	72.05					1.198		
41.40	40.15	81.55	49.20	130.50	75.65	54.85	1.904	46° 00	50.20
41.05	39.95	81.00	51.20	132.05	54.00	78.05			
41.00	39.70	80.70					1.900		
22.00	20.60	42.60	61.20	103.30	62.05	41.25	2.639	62° 95	62.35
21.45	20.10	41.55	63.40	104.60	40.35	64.25			
21.05	19.85	40.90					2.641		
20.40	19.15	39.55	61.85	100.90	60.95	39.90	2.645		
20.15	19.05	39.20	63.25	102.20	39.20	63.00			
20.00	18.70	38.70					2.651		

Tabl. 2 (Suite).

a_1	a_2	$a_1 + a_2$	$\beta_1 + \beta_2$ $-(a_1 + a_2)$	$\beta_1 + \beta_2$	β_1	β_2	T	Valeurs parallèles	
								de la Temp. C.°	du courant
45.00	43.85	88.85	65.85	154.60	87.75	66.85	2.939	69°50	66.60
44.95	43.70	88.65	67.45	155.95	66.10	89.85			
44.90	43.45	88.35					2.941		
45.50	44.20	89.70	65.80	155.30	88.10	67.20	2.939	69°50	66.60
45.20	44.10	89.30	67.25	156.50	66.35	90.15			
45.20	41.00	89.20					2.930		
32.10	30.85	62.95	73.30	135.75	78.30	57.45	3.415	80°25	74.15
31.70	30.25	61.90	74.85	136.30	56.75	79.55			
31.15	29.90	61.05					3.411		
30.20	28.95	59.15	73.25	132.00	76.10	55.90	3.430	80°25	74.15
29.85	28.50	58.35	75.15	133.20	55.10	78.10			
29.55	28.20	57.75					3.444		
35.20	34.00	69.20	84.35	153.20	87.05	66.15	4.278	98°50	85.45
34.90	33.60	68.50	86.60	154.65	65.20	89.45			
34.45	33.15	67.60					4.266		
44.25	43.05	87.30	89.40	177.20	99.10	78.10	4.623	105°80	89.95
44.75	43.50	88.25	90.50	179.05	77.45	101.60			
45.05	43.80	88.90					4.612		
41.50	40.20	81.70	96.45	177.65	99.35	78.30	5.246	118°75	97.35
41.05	39.70	80.75	98.25	178.35	77.15	101.20			
40.35	39.05	79.40					5.236		
33.80	32.20	66.00	106.30	171.85	96.45	75.40	6.109	135°75	106.60
33.15	31.95	65.10	107.25	172.15	74.35	97.80			
33.00	31.65	64.65					6.097		
32.05	30.60	62.65	105.70	167.90	94.70	73.20	6.055	135°75	106.60
31.55	30.20	61.75	107.25	168.75	72.35	96.40			
31.30	30.05	61.35					6.035		

Les valeurs numériques des courants enregistrées sous a et β ont été lues directement sur le milliampèremètre, la conversion en Ampère étant superflue ici, où il ne s'agit que de mesures relatives. Le milliampèremètre était pourvu d'un shunt, de sorte que 1 division signifie 0.002 Ampère. La

Tabl. 3.

Mesures sur le même ballon rempli de 0,2350 g d'eau distillée.

α_1	α_2	$\alpha_1 + \alpha_2$	$\beta_1 + \beta_2$ $-(\alpha_1 + \alpha_2)$	$\beta_1 + \beta_2$	β_1	β_2	T	Valeurs parallèles	
								de la Temp. C.°	du courant
23.85	22.95	46.80	51.95	98.40	59.30	39.10	0.328	- 7° 95	52.75
23.80	22.35	46.15	53.55	99.45	37.80	61.65			
23.50	22.15	45.65					0.301		
12.70	11.25	33.95	59.80	93.70	57.40	36.30	0.128	+ 1° 25	60.80
12.60	11.30	33.90	61.80	95.70	35.90	59.80			
12.60	11.25	33.85					0.162		
16.05	15.50	31.55	73.90	105.80	63.15	42.65	0.728	17° 90	74.70
16.65	15.60	32.25	75.75	108.40	42.05	66.35			
17.05	15.95	33.00					0.718		
16.70	15.20	31.90	73.50	105.80	63.40	42.40	0.721	33° 50	86.90
16.85	15.85	32.70	75.65	108.50	42.25	66.25			
17.05	15.95	33.00					0.720		
16.55	15.30	31.85	85.85	118.10	69.50	48.60	1.371	43° 95	94.80
16.85	15.80	32.65	87.90	120.65	48.20	72.45			
17.00	15.90	32.90					1.369		
26.35	25.10	51.45	93.70	145.65	83.40	62.25	1.810	54° 20	102.20
26.80	25.65	52.45	95.40	148.05	61.95	86.10			
26.95	25.90	52.85					1.806		
23.70	22.25	45.95	94.25	139.85	80.30	59.55	1.823	66° 90	110.90
23.25	22.05	45.30	95.85	140.80	58.35	82.45			
23.00	21.55	44.55					1.819		
13.25	12.05	25.30	101.30	126.60	73.80	52.80	2.256	67° 25	110.95
13.25	12.10	25.35	103.25	128.65	52.30	76.35			
13.35	12.10	25.45					2 262		
17.00	15.70	32.70	109.55	142.45	81.60	60.85	2.819	75° 80	116.90
17.05	16.00	33.05	112.25	145.55	60.95	84.60			
17.40	16.20	33.60					2.823		
17.45	16.20	33.65	109.80	143.50	82.65	60.85	2.832	75° 80	116.90
17.45	16.25	33.70	112.10	146.00	61.05	84.95			
17.80	16.30	34.10					2.842		
25.25	24.00	49.25	115.85	165.50	93.10	72.40	3.230	75° 80	116.90
25.55	24.45	50.00	117.95	168.20	72.00	96.20			
25.85	24.65	50.50					3.216		

Tabl. 3 (Suite).

a_1	a_2	$a_1 + a_2$	$\beta_1 + \beta_2 - (a_1 + a_2)$	$\beta_1 + \beta_2$	β_1	β_2	T	Valeurs parallèles	
								de la Temp. C.°	du courant
11.90	10.55	22.45	123.75	146.35	83.62	62.70	3.769	88°.10	124.90
11.95	10.85	22.80	125.60	148.65	62.40	86.25			
12.20	11.05	23.25					3.791		
12.90	11.65	24.55	124.25	148.85	84.50	64.35	3.793		
12.90	11.75	24.65	125.95	150.75	62.95	87.80			
13.10	11.90	25.00					3.795		
16.90	15.40	32.30	133.95	166.55	93.75	72.80	4.554	104°.50	134.95
16.95	15.95	32.90	135.95	169.05	72.50	96.55			
17.30	16.05	33.35					4.558		
19.80	18.50	38.30	144.30	182.75	101.60	81.15	5.422	122°.55	145.40
19.85	18.75	38.60	146.55	185.45	81.00	104.45			
20.20	19.00	39.20					5.429		
18.75	17.65	36.40	148.30	184.05	102.60	81.45	5.743	129°.35	149.05
18.10	17.00	35.10	149.80	184.50	80.40	104.10			
17.90	16.45	34.35					5.765		

Tabl. 4.

Résultat des mesures indiquées dans les tabl. 2 et 3, fig. 2.

Température C.°	Lecture sur les courbes		Différence	Correction relative à l'air	Différence corrigée	$-\chi \cdot 10^{-6}$
	II	I				
0	59.80	13.30	46.50	-2.47	44.03	0.718 ₀
10	68.35	21.90	46.45	2.30	44.15	0.720 ₀
20	76.40	30.10	46.30	2.15	44.15	0.720 ₀
30	84.30	38.05	46.25	2.01	44.24	0.721 ₅
40	91.90	45.75	46.15	1.88	44.27	0.722 ₀
50	99.20	53.10	46.10	1.76	44.34	0.723 ₁
60	106.20	60.20	46.00	1.66	44.34	0.723 ₁
70	113.00	67.05	45.95	1.56	44.39	0.723 ₉
80	119.65	73.75	45.90	1.48	44.42	0.724 ₄
90	126.10	80.20	45.90	1.40	44.50	0.725 ₇
100	132.30	86.45	45.85	1.32	44.53	0.726 ₂
110	138.20	92.35	45.85	1.26	44.59	0.727 ₂
120	143.90	98.10	45.80	1.19	44.61	0.727 ₅
130	149.35	103.60	45.75	1.13	44.62	0.727 ₇

bobine S_3 était parcourue, pour toutes les mesures, par un courant de 0.0045 Ampère.

Le tabl. 3 contient les chiffres correspondants pour le même ballon lorsque celui-ci renfermait 0.2350 g d'eau distillée.

Dans la fig. 2 sont tracées deux courbes déterminées de

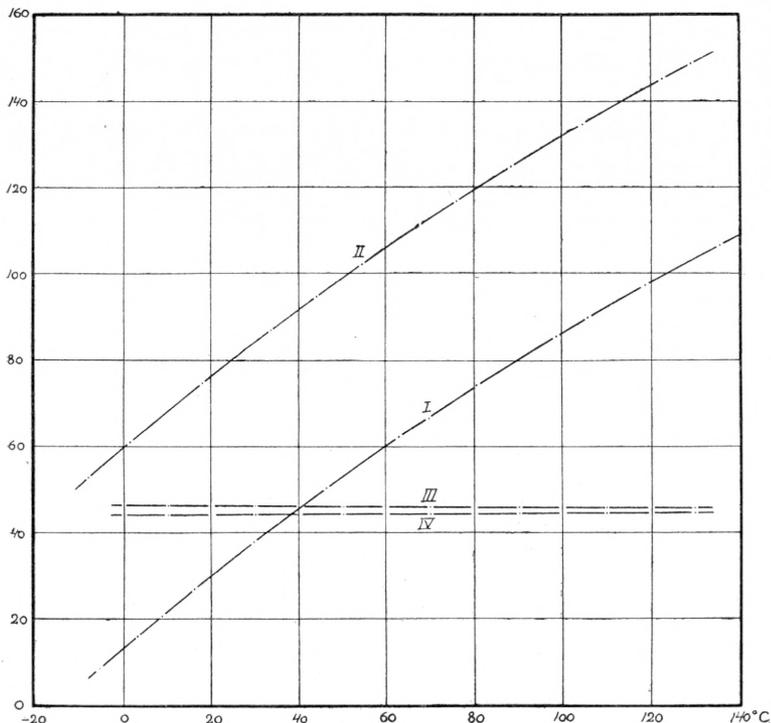


Fig. 2.

cette manière et représentant les tabl. 2 et 3. La courbe I se rapporte au ballon vide, tandis que II concerne le ballon rempli d'eau. On a porté en abscisse les températures en degrés centigrades, en ordonnée les courants qui y correspondent, en prenant pour unité 1 division du milliampèremètre. Comme on le voit, les points qui représentent les mesures elles-mêmes se trouvent disposés sur les courbes d'une façon aussi régulier-

lière qu'on pouvait s'y attendre. Les points qui le sont de la façon la moins satisfaisante sont ceux qui se rapportent à environ 70° ; cependant l'écart ne se monte qu'à 0.3 d'une division du milliampèremètre et, conséquemment, il s'explique facilement par des erreurs de lecture. Quant à la forte ascension, et à la légère incurvation concomitante, des courbes I et II, elles sont dues principalement à ces fils d'aluminium que nous avons placés dans le tube *CD*. Le paramagnétisme de ces fils diminue avec l'élévation de la température, ce qui a pour effet que la balance de torsion devient de plus en plus diamagnétique.

En opérant sur des liquides, on a dû, il est vrai, se limiter en général à des intervalles de température relativement peu étendus; c'est ainsi que, par ex., la méthode d'ascension ne permet guère d'examiner l'eau avec une exactitude quelque peu suffisante au dehors de l'intervalle $0-70^{\circ}$ C. Pourtant, ainsi que le montre le tabl. 3, j'ai pu examiner de l'eau ayant une température au-dessous de zéro, aussi bien que de l'eau chauffée au-dessus de 100° C. Après avoir rempli le ballon de quartz, je l'avais fermé par fusion, et la limite supérieure de la température dépendait, par conséquent, de la pression intérieure qu'il pourrait supporter; je n'ai pas opéré à des températures supérieures à 136° C., correspondant à env. 3.5 atmosphères. La grande étendue du domaine de mesures dont il est ainsi question, offre des avantages considérables pour la détermination de l'influence exercée sur le coefficient par la température.

La différence entre les ordonnées des deux courbes I et II de la fig. 2 donne la mesure du coefficient d'aimantation aux différentes températures. Toutefois, afin de rapporter cette constante au vide, il faut y appliquer une correction, vu que, lors de la détermination de la courbe 1, le ballon «vide» renfermait de l'air atmosphérique. La correction afférente est maintenant assez bien connue. — La suscepti-

bilité de l'oxygène à la température de la chambre a été déterminée avec une approximation parfaitement satisfaisante¹, et des recherches récentes très approfondies² ont eu pour résultat de vérifier que l'oxygène peut être considéré avec une certitude bien suffisante comme obéissant à la loi de Curie. En comparaison de cet élément, l'azote doit être regardé comme non-magnétique.

Cette différence apparaît non corrigée dans la courbe III de la fig. 2, et la courbe IV la montre corrigée.

Le tabl. 4 réunit les courants lus sur les courbes I et II de la fig. 2 pour chaque 10^{ème} degré, et aussi leurs différences (courbe III); en outre, les corrections à introduire au point de vue de l'air aux différentes températures employées, ainsi que les différences ainsi corrigées (courbe IV, fig. 2). Enfin, la dernière colonne donne les coefficients correspondant aux mesures, le coefficient à 20° C. ayant été évalué à $-0.720 \cdot 10^{-6}$, de sorte que toutes les différences corrigées ont dû être multipliées par $-\frac{0.720 \cdot 10^{-6}}{44.15}$.

Tandis que, pour chacune des courbes de la fig. 2, les ordonnées peuvent être considérées comme déterminées avec une approximation de 0.1 à 0.2 d'une division, il va sans dire que la précision relative avec laquelle il sera possible de calculer le coefficient d'une substance dépendra de la valeur absolue de cette constante. En ce qui concerne l'eau, on voit que la constante est déterminée avec une exactitude d'env. 0,5 pour 100, exactitude qui est la même pour toutes les températures considérées, attendu qu'il est facile de déterminer celles-ci avec une sûreté correspondante. Il n'en est pas de même pour aucun des appareils basés sur le principe d'ascension.

Il mérite d'être mentionné que l'appareil décrit ci-dessus

¹ PICCARD: *loc. cit.*

² Dues principalement à KAMERLINGH ONNES et ses élèves, à Leyde.

se prête non seulement à l'étude des liquides, mais encore — et tout aussi bien — à celle des corps solides. Pour ces derniers, il peut également y avoir avantage à utiliser des ballons de quartz fermés par la fusion.

On peut, à la vérité, faire à notre appareil le reproche que le résultat est exprimé par la différence entre deux groupes de mesures. C'est là certes un inconvénient qui, tout en prolongeant le temps qu'exige chaque examen en particulier, tend à amoindrir la sûreté de notre procédé. —

*

*

*

A l'aide de cet appareil j'ai réalisé plusieurs séries de recherches sur l'eau distillée, en employant des ballons divers et différentes quantités d'eau. D'après ce qui a été dit précédemment au sujet de la sensibilité de l'appareil, il était à prévoir qu'il serait possible de vérifier si le coefficient de température du coefficient d'aimantation de l'eau rapporté au vide possède la forte valeur négative trouvée par les expérimentateurs anciens, ou bien si sa valeur est positive. L'évènement a pleinement justifié cette prévision, en ce sens qu'aucune de mes séries de mesures n'a donné un coefficient de température négatif. Cependant, les coefficients trouvés, toujours positifs, sont apparus dans toutes les mesures comme tellement minimes, qu'il est très difficile d'en déterminer la valeur exacte. A en juger par les résultats auxquels je suis arrivé, il paraît le plus vraisemblable que le coefficient cherché a la grandeur $+ 0.00007$. Et ce chiffre paraît demeurer constant pour toutes les températures considérées, résultat qui ne s'accorde pas tout à fait avec les mesures de PICCARD, qui donnèrent à la température de la chambre un coefficient un peu plus grand, mais aux températures plus élevées un coefficient égal à zéro. Il est à remarquer cependant que PICCARD, préoccupé tout particulièrement de la détermination de la susceptibilité de l'eau à la température de

la chambre, ne s'est guère appliqué à rechercher le coefficient de température. La méthode d'ascension par lui employée, bien qu'il l'ait développée jusqu'à un haut degré de perfection, ne saurait, de son propre aveu, donner une bien grande précision aux températures élevées. — Au reste, la différence entre les valeurs trouvées est si minime, qu'on peut, semble-t-il, la laisser de côté en présence de la précision qu'on est actuellement en état d'atteindre dans l'étude des corps faiblement magnétiques. —

Je dois à la Donation de *Carlsberg* ma reconnaissance pour une subvention qu'elle a bien voulu m'accorder et qui m'a permis de me procurer la plupart des appareils nécessaires aux recherches que je viens de relater. Je me fais également un devoir de renouveler encore ici à M. le Professeur P. WEISS, à Zurich, l'expression de ma vive gratitude pour l'instruction inestimable que j'ai eu la bonne fortune de recevoir au cours d'un stage fait dans son laboratoire, et qui malheureusement fut interrompu par la guerre. Enfin, je saisis cette occasion pour exprimer au directeur du Laboratoire de Physique de Copenhague, M. le Prof. K. PRYTZ, mes remerciements bien sincères pour le grand intérêt qu'il a témoigné à mon travail et pour le précieux concours qu'il n'a cessé de me prodiguer.

Laboratoire de Physique de l'École Polytechnique
de Copenhague.
