

---

SUR

# L'AIMANTATION DU NICKEL,

INFLUENCE DE LA LONGUEUR DES BARREAUX,

PAR M. G. BERSON,

Professeur de Physique à la Faculté des Sciences de Toulouse.

---

1. Je me suis proposé de résoudre pour le nickel l'un des problèmes que M. Mascart a traités pour le fer il y a quelques années <sup>(1)</sup>, c'est-à-dire de rechercher comment varie, dans un champ uniforme donné, l'intensité moyenne d'aimantation d'un cylindre de nickel placé parallèlement au champ quand varie le rapport de la longueur du cylindre à son diamètre. Le quotient de cette intensité moyenne  $A$  par la force du champ donne un coefficient moyen d'aimantation  $f$ , qui aurait pour limite le coefficient d'aimantation  $k$  caractérisant la susceptibilité magnétique du corps dans ce champ si le cylindre était infiniment long. L'intensité moyenne d'aimantation étant le quotient du moment magnétique  $M$  par le volume, le calcul de ce nombre  $A$  exige la détermination du moment magnétique.

2. Le moment magnétique  $M$  du barreau est mesuré par la méthode de Gauss, l'aimant étant placé horizontalement dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique et passant par le centre du déclinomètre. La longueur de l'aimant du déclinomètre est de 3<sup>cm</sup>,15. La plus grande longueur des barreaux sur lesquels j'ai expérimenté est de 80<sup>cm</sup> et leur milieu était toujours placé à une distance de 91<sup>cm</sup>,3 du milieu de l'aimant dévié. On peut, dans ces conditions, remplacer la distance des divers points du bar-

---

<sup>(1)</sup> *Journal de Physique*, 2<sup>e</sup> série, t. V, p. 293.

reau déviant aux pôles de l'aimant du déclinomètre par leur distance au centre de ce dernier : le moment du couple qui produit la déviation n'est altéré que de 0,0016 ou de beaucoup moins de  $\frac{1}{500}$  de sa valeur par cette approximation. La formule qui donne M devient alors

$$M = \frac{H}{2} \frac{(r^2 - l^2)^2}{r} \operatorname{tang} \alpha,$$

H étant la composante horizontale terrestre,  
 r la distance des centres des deux barreaux,  
 $\alpha$  la déviation,  
 2l la distance des pôles de l'aimant déviant.

La distance de l'échelle au miroir du déclinomètre est de 376<sup>cm</sup>; si donc  $\delta$  est le déplacement lu sur l'échelle, correspondant à la déviation  $\alpha$ , la formule deviendra

$$M = \frac{H}{2} \frac{1}{2 \times 376} \frac{(r^2 - l^2)^2}{r} \delta.$$

Le nombre  $\delta$  est déterminé par le pointé de trois élongations successives du déclinomètre.

La composante horizontale terrestre H est connue à la place même occupée par le déclinomètre, au moyen d'un petit barreau auxiliaire de moment magnétique m, par la détermination de mH et de  $\frac{m}{H}$ . Elle a été trouvée égale à 0,2480 C.G.S. Ce nombre élevé (*l'Annuaire du Bureau des Longitudes* ne donne pour valeur de H à Toulouse que 0,2164) s'explique par le fait que mes expériences ont été effectuées dans un laboratoire du sous-sol de la Faculté des Sciences, dont le plafond est membré de fortes poutres d'un fer plus ou moins aciéré qui s'était certainement aimanté sous l'action de la Terre pendant qu'il était travaillé.

La longueur l a été déterminée de façons diverses. Pour certains barreaux ayant été déjà étudiés dans des recherches antérieures (<sup>1</sup>), l a été calculé d'après les formules représentant la distribution de la couche fictive sur les parois latérales et sur les bases terminales; c'est ainsi que les pôles

---

(<sup>1</sup>) *Annales de Chimie et de Physique*, 6<sup>e</sup> série, t. VIII, p. 476, et *Journal de Physique*, 2<sup>e</sup> série, t. V, p. 452.

ont été trouvés à une distance des sommets égale à

0,511 <sup>cm</sup>	pour l'aimantation totale,
0,650	» résiduelle,
0,225	» temporaire.

Pour d'autres,  $l$  a été calculé en mesurant le moment magnétique  $M$  à des distances différentes du déclinomètre. Pour deux distances  $r$  et  $r'$ , on a les équations

$$\frac{2M}{H} = \frac{(r^2 - l^2)^2}{r} \operatorname{tang} \alpha = \frac{(r'^2 - l^2)^2}{r'} \operatorname{tang} \alpha';$$

l'égalité des deux derniers rapports fait connaître  $l$ .

Le champ uniforme employé est le champ intérieur d'une longue bobine de 130<sup>cm</sup> de longueur et de 3<sup>cm</sup> de diamètre, dont l'action propre était compensée par celle d'une autre bobine courte placée de l'autre côté du déclinomètre et traversée par le même courant. La compensation des bobines était toujours vérifiée avant et après les opérations sur chaque barreau. La bobine magnétisante est formée de trois couches de spires de 1030, 1022 et 1015 spires, ce qui donne comme nombre de spires par unité de longueur  $n_1 = 25,65$ . La force du champ est  $F = 4\pi n_1 I$ ,  $I$  étant l'intensité du courant mesurée en unités C.G.S. par un galvanomètre aperiodyque Deprez-d'Arsonval, placé sur un shunt et gradué.

3. J'ai opéré sur diverses sortes de nickel dans des champs variant de 0 à 146 C.G.S. Une partie de mes expériences a porté sur du fil de nickel de 0<sup>cm</sup>,135 de diamètre, de densité 8,74 à 22°. C'est un nickel contenant un peu moins de 1 pour 100 de fer. Les tiges découpées dans ce fil avaient des longueurs croissant de 10 en 10 centimètres depuis 0 jusqu'à 80; les rapports des longueurs aux diamètres étaient donc de

74,07 148,15 222,22 296,30 370,38 444,44 518,53 592,70.

J'ai employé aussi des barreaux dont la section carrée a 0<sup>cm</sup>,2 de côté et dont les longueurs sont de 9<sup>cm</sup>, 18<sup>cm</sup> et 27<sup>cm</sup>. Ce métal a été obtenu par le laminage de cahiers de feuilles métalliques déposées par l'électrolyse. Aussi sa densité n'est-elle que de 7,03. Les rapports des longueurs aux diamètres des sections circulaires équivalentes sont de

39,88 79,76 et 119,64.

Ces différents échantillons de nickel ne sont pas chimiquement purs, surtout les premiers. La présence d'une petite quantité de substances étrangères modifie certainement leur susceptibilité magnétique; on sait que les alliages de fer et de nickel présentent, au point de vue magnétique, de curieuses singularités. Le regretté M. Debray, qui s'était intéressé à mes recherches, avait bien voulu me promettre de me donner, si cela lui était possible, du nickel pur; après des tentatives multiples et également infructueuses pour obtenir des lingots pouvant être amenés en barreaux par des procédés mécaniques, M. Debray me remit du nickel pur en poudre et en grenaille. J'ai construit des cylindres métalliques en tassant cette poudre et cette grenaille dans des tubes de verre de plusieurs calibres: c'était toujours le même nickel, recuit constamment à la même température de  $340^{\circ}$ , occupant toujours le même volume  $10^{\text{cm}^3}$ , 270 sous des longueurs allant de  $4^{\text{cm}},9$  à  $71^{\text{cm}}$ ; les rapports des longueurs aux diamètres sont de

$$3,000 \quad 6,458 \quad 28,34 \quad 62,24 \quad \text{et} \quad 165,44;$$

la densité est de 2,77.

4. *Aimantation totale.* — Pour les fils, les variations de l'intensité moyenne d'aimantation totale sont données par le Tableau suivant, dans lequel la première colonne contient les valeurs du champ F en unités C.G.S., et les autres colonnes les valeurs absolues de A.

Tableau I.

F.	10 <sup>cm</sup> .	20 <sup>cm</sup> .	30 <sup>cm</sup> .	40 <sup>cm</sup> .	50 <sup>cm</sup> .	60 <sup>cm</sup> .	70 <sup>cm</sup> .	80 <sup>cm</sup> .
18,32	71,7	86,8	96,6	102,2	106,8	108,7	111,6	113,6
36,64	163,2	186,3	199,7	207,8	211,3	214,9	218,8	223,9
54,95	234,6	246,4	255,3	257,7	264,6	268,9	267,8	268,2
73,27	259,4	266,7	274,4	276,3	285,9	289,2	288,3	291,0
91,59	276,0	280,9	288,9	289,2	298,9	301,9	302,1	305,1
109,91	290,6	296,8	300,1	305,2	307,5	308,6	310,5	313,3
128,23	303,4	304,8	306,3	310,9	312,4	313,1	315,3	316,6
146,53	308,4	309,9	311,4	313,4	314,7	315,2	317,1	317,6

On voit que :

1° Pour les petites forces, A croît rapidement avec la longueur de la tige;

2° Cet accroissement est de moins en moins rapide à mesure que la valeur de la force s'élève;

3° Cet accroissement est surtout marqué pour les tiges de petite longueur. Ainsi, dans un champ égal à 18,32, le rapport de l'accroissement de la valeur de A à sa valeur moyenne quand la longueur passe de 10<sup>cm</sup> à 20<sup>cm</sup> est de 0,190, tandis qu'elle n'est plus que de 0,011 quand on passe d'un fil de 70<sup>cm</sup> à un fil de 80<sup>cm</sup>.

Pour les barreaux carrés, dont la densité est moindre que celle des fils précédents, l'intensité moyenne d'aimantation est beaucoup plus petite.

Tableau II.

F.	9 <sup>cm</sup> .	18 <sup>cm</sup> .	27 <sup>cm</sup> .
18,32	7,73	8,007	11,57
36,64	16,46	18,25	24,50
54,95	36,28	36,51	46,96
73,27	59,79	59,56	70,43
91,59	76,92	77,67	87,79
109,91	91,70	91,92	100,38

Les nombres sont certainement un peu faibles pour le barreau de 18<sup>cm</sup> dont un des bouts s'est légèrement effeuillé. Sous le bénéfice de cette remarque, les conclusions sont les mêmes que les précédentes.

Enfin, pour les barreaux constitués avec de la grenaille et de la poudre de nickel, l'allure générale du phénomène est encore la même, comme cela résulte du Tableau suivant :

Tableau III.

F.	4 <sup>cm</sup> ,9.	8 <sup>cm</sup> ,17.	21 <sup>cm</sup> ,9.	37 <sup>cm</sup> ,0.	71 <sup>cm</sup> ,0.
18,32	1,53	1,61	1,73	1,76	1,79
36,64	3,09	3,27	3,51	3,63	3,66
54,95	4,65	5,19	5,48	5,51	5,54
73,27	6,41	7,08	7,50	7,51	7,53
91,59	8,05	8,73	9,28	9,39	9,41
109,91	9,24	10,07	10,78	10,82	10,93

On peut remarquer que, en raison de la faible densité du métal, l'intensité moyenne d'aimantation varie faiblement d'un cylindre à l'autre, sauf pour les très courts barreaux dont la longueur n'est que le sextuple ou le triple du diamètre.

5. Si l'on considère d'autre part le rapport  $f$  de l'intensité moyenne d'aimantation totale à la force du champ de la bobine,  $f = \frac{A}{F}$ , on sait que

ce nombre, d'abord croissant, atteint bientôt un maximum pour tendre ensuite vers zéro quand la force magnétisante augmente indéfiniment. On trouve ci-dessous les Tableaux des valeurs de  $f$  correspondantes aux intensités d'aimantation des Tableaux précédents et qui, pour un même champ, leur sont évidemment proportionnelles. Le Tableau IV est relatif aux tiges de nickel de 0<sup>cm</sup>,135 de diamètre.

Tableau IV.

F.	10 <sup>cm</sup> .	20 <sup>cm</sup> .	30 <sup>cm</sup> .	40 <sup>cm</sup> .	50 <sup>cm</sup> .	60 <sup>cm</sup> .	70 <sup>cm</sup> .	80 <sup>cm</sup> .
18,32	3,91	4,74	5,27	5,59	5,83	5,93	6,09	6,20
36,64	4,45	5,085	5,45	5,67	5,77	5,87	5,97	6,11
54,95	4,27	4,48	4,54	4,69	4,81	4,89	4,87	4,88
73,27	3,54	3,64	3,74	3,77	3,90	3,95	3,93	3,97
91,59	3,01	3,07	3,15	3,16	3,26	3,30	3,30	3,32
109,91	2,64	2,70	2,73	2,78	2,86	2,81	2,82	2,83
128,23	2,37	2,38	2,39	2,42	2,44	2,44	2,46	2,47
146,53	2,11	2,115	2,12	2,14	2,15	2,15	2,16	2,16

Le Tableau V se rapporte aux barreaux de section carrée.

Tableau V.

F.	9 <sup>cm</sup> .	18 <sup>cm</sup> .	27 <sup>cm</sup> .
18,32	0,422	0,437	0,632
36,64	0,449	0,498	0,669
54,95	0,660	0,664	0,854
73,27	0,816	0,813	0,961
91,59	0,840	0,848	0,958
109,91	0,834	0,837	0,913

Enfin le Tableau VI donne les valeurs du coefficient  $f$  pour les cylindres de poudre de nickel.

Tableau VI.

F.	4 <sup>cm</sup> ,9.	8 <sup>cm</sup> ,17.	21 <sup>cm</sup> ,9.	37 <sup>cm</sup> ,0.	71 <sup>cm</sup> ,0.
18,32	0,0835	0,088	0,094	0,096	0,098
36,64	0,084	0,089	0,096	0,099	0,100
54,95	0,085	0,094	0,100	0,103	0,101
73,27	0,085	0,097	0,102	0,1025	0,103
91,59	0,085	0,095	0,101	0,102	0,103
109,91	0,084	0,092	0,098	0,098	0,099

On voit, à l'inspection de ces nombres, que pour les fils le maximum a

lieu beaucoup plus rapidement que pour les barreaux de faible densité. Ainsi, pour les fils dont la plus petite longueur est  $10^{\text{cm}}$ , il est atteint dans un champ au plus égal à  $41,5$ , tandis que, pour les barreaux carrés et les tubes, il ne se présente que dans des champs dépassant  $70$  et allant jusqu'au delà de  $90$ .

Pour ces derniers cylindres, le coefficient  $f$  est faible, il ne dépasse guère  $\frac{1}{10}$ . Il en résulte que le phénomène se rapproche de celui des métaux peu magnétiques ou diamagnétiques : l'intensité d'aimantation est sensiblement proportionnelle à  $F$ , sauf pour les grandes valeurs de cette force; par suite,  $f$  varie très peu pour un même barreau et même, à l'exception des cylindres de petite longueur, change peu quand on passe d'un barreau à un autre. On peut présumer que la valeur maxima limite de  $f$  diffère peu de  $0,103$ , qui serait ainsi le maximum du coefficient d'aimantation  $k$  du nickel sous cette forme et sous cette densité.

D'autre part, le maximum de la valeur de  $f$  se présente pour une force d'autant plus faible que le barreau est plus long. On peut déterminer approximativement cette force par la construction de la courbe d'aimantation à laquelle on mène la tangente issue de l'origine. Pour les fils de  $10^{\text{cm}}$ , cette force est de  $41,5$ , tandis que, pour le fil de  $80^{\text{cm}}$ , elle n'est plus que de  $25,5$ ; pour les autres fils, les forces correspondantes au maximum de  $f$  s'échelonnent entre ces deux nombres.

Enfin, à mesure que s'abaisse cette force, la valeur du maximum de  $f$  s'élève : pour le fil de  $10^{\text{cm}}$ , le maximum est de  $\frac{18,95}{41,5} = 4,566$  et, pour le fil de  $80^{\text{cm}}$ , il est de  $\frac{17,08}{25,5} = 6,698$ .

6. *Aimantation résiduelle.* — L'aimantation résiduelle du nickel présente, en général, les mêmes variations, mais plus accentuées que l'aimantation totale.

Tableau VII.

Fils de  $0^{\text{cm}},135$  de diamètre.

F.	$10^{\text{cm}}$ .	$20^{\text{cm}}$ .	$30^{\text{cm}}$ .	$40^{\text{cm}}$ .	$50^{\text{cm}}$ .	$60^{\text{cm}}$ .	$70^{\text{cm}}$ .	$80^{\text{cm}}$ .
18,32	28,0	49,1	61,4	68,6	73,2	74,4	76,1	77,2
36,64	95,8	128,2	146,7	157,3	159,6	161,2	162,8	166,6
54,95	135,4	168,5	188,5	195,4	200,2	201,4	197,9	196,7
73,27	142,4	173,9	195,4	202,7	209,8	208,6	205,1	207,4
91,59	149,7	179,4	201,7	207,6	216,1	216,4	213,3	214,5
109,91	157,4	189,3	206,4	218,7	221,0	220,8	219,8	220,7
128,23	162,6	191,3	208,1	220,0	223,0	223,4	223,5	223,9
146,53	163,9	191,7	209,3	220,9	224,0	224,6	224,8	224,8

Tableau VIII.

Barreaux de section carrée.

F.	9 <sup>cm.</sup>	18 <sup>cm.</sup>	27 <sup>cm.</sup>
18,32	3,36	4,49	8,855
36,64	6,72	9,61	18,73
54,95	21,84	23,07	36,78
73,27	42,00	43,91	55,17
91,59	55,94	59,77	70,84
109,91	67,70	71,46	81,74

Pour les cylindres de nickel en poudre, l'aimantation résiduelle est si faible que les erreurs d'observations peuvent être une fraction importante de sa valeur : nous n'en parlerons pas.

On peut faire sur le coefficient  $f$  relatif à l'aimantation résiduelle les mêmes remarques que dans le cas de l'aimantation totale.

Tableau IX.

F.	10 <sup>cm.</sup>	20 <sup>cm.</sup>	30 <sup>cm.</sup>	40 <sup>cm.</sup>	50 <sup>cm.</sup>	60 <sup>cm.</sup>	70 <sup>cm.</sup>	80 <sup>cm.</sup>
18,32	1,53	2,68	3,35	3,74	4,00	4,06	4,15	4,21
36,64	2,62	3,50	4,00	4,29	4,36	4,40	4,44	4,55
54,95	2,46	3,07	3,43	3,56	3,64	3,67	3,60	3,58
73,27	1,94	2,37	2,67	2,77	2,80	2,85	2,80	2,83
91,59	1,63	1,96	2,20	2,27	2,36	2,36	2,33	2,34
109,91	1,43	1,72	1,88	1,99	2,01	2,01	2,00	2,01
128,23	1,27	1,49	1,62	1,72	1,74	1,74	1,74	1,75
146,53	1,12	1,31	1,43	1,51	1,53	1,53	1,53	1,53

7. *Aimantation temporaire.* — On conçoit l'accroissement continu des intensités d'aimantation totale et d'aimantation résiduelle avec la longueur du barreau. L'aimantation induite est, en effet, la somme des termes d'une série convergente à termes alternativement positifs et négatifs. Le premier terme serait l'aimantation uniforme due au champ uniforme de la bobine; le deuxième terme, de signe contraire, serait l'aimantation due à la force provenant de cette aimantation uniforme; le troisième terme, de même signe que le premier, résulterait de la force émanée du magnétisme qui correspond au deuxième, etc. Les deux premiers termes sont clairement d'une importance très prépondérante. Or le premier terme est le même pour les barreaux de toutes les longueurs et de toutes les sections, le deuxième dépend de la longueur et de la section. Pour des barreaux de même section, à une distance donnée d'une extrémité, la force provenant

de l'aimantation uniforme correspondant au premier terme de la série est d'autant plus petite que le barreau est plus long et, par suite, le deuxième terme est d'autant plus petit : d'où l'accroissement de l'aimantation induite avec la longueur des tiges placées dans un champ donné.

Le raisonnement ne s'applique plus à l'aimantation temporaire. Supposons, en effet, tout d'abord que, dans des fils de même section et de longueurs diverses, l'aimantation totale soit la même à partir des extrémités. La force démagnétisante en un point situé à une distance donnée du bout sera d'autant plus petite que le barreau sera plus long. Au moment précis où le courant de la bobine est interrompu, cette force démagnétisante existe seule et l'on conçoit que, conformément aux idées qui résultent des expériences de M. Ewing, les aimants moléculaires qui constituent le barreau reviennent vers une position d'équilibre d'autant plus éloignée de la précédente que cette force démagnétisante sera plus grande, c'est-à-dire que l'aimantation temporaire varie en sens contraire de la longueur de l'aimant. Toutefois, comme je l'ai montré, des barreaux placés dans le même champ prennent une aimantation totale qui est une fonction croissante du rapport de la longueur au diamètre : c'est ce qui explique que, pour les barreaux longs, l'aimantation temporaire cesse de diminuer quand la longueur augmente, et même devienne croissante, comme il résulte du Tableau X <sup>(1)</sup> relatif aux fils de nickel de 0<sup>cm</sup>,135 de diamètre.

Tableau X.

F.	10 <sup>cm</sup> .	20 <sup>cm</sup> .	30 <sup>cm</sup> .	40 <sup>cm</sup> .	50 <sup>cm</sup> .	60 <sup>cm</sup> .	70 <sup>cm</sup> .	80 <sup>cm</sup> .
18,32	43,7	37,8	35,2	33,8	33,6	34,2	35,5	36,4
36,64	67,3	58,1	52,9	50,6	51,7	53,8	56,0	57,3
54,95	99,2	77,9	66,9	62,3	64,5	67,5	69,9	71,5
73,27	117,0	92,8	79,0	73,5	76,1	80,6	83,1	83,7
91,59	126,3	101,5	87,3	81,6	82,8	85,4	88,8	90,6
109,91	133,2	107,5	93,7	86,5	86,5	87,8	90,7	92,5
128,23	140,8	113,5	98,3	90,9	89,4	89,7	91,8	92,7
146,53	144,5	118,2	102,0	92,5	90,8	90,6	92,3	92,8

Quant au rapport  $f$  de l'aimantation temporaire à la force du champ, il

(1) Les Tableaux X et XI ne portent que les différences des nombres homologues des Tableaux I et VII et des Tableaux IV et IX. Ils ne sont donnés ici que pour faciliter la lecture de ce travail.

atteint très vite son maximum; la force correspondante pour les fils de nickel est toujours inférieure à quinze unités.

*Tableau XI.*

F.	10 <sup>cm.</sup>	20 <sup>cm.</sup>	30 <sup>cm.</sup>	40 <sup>cm.</sup>	50 <sup>cm.</sup>	60 <sup>cm.</sup>	70 <sup>cm.</sup>	80 <sup>cm.</sup>
18,32	2,39	2,06	1,92	1,84	1,83	1,87	1,94	1,99
36,64	1,83	1,585	1,44	1,38	1,41	1,47	1,53	1,56
54,95	1,81	1,41	1,22	1,13	1,17	1,23	1,27	1,30
73,27	1,60	1,27	1,08	1,00	1,04	1,10	1,13	1,14
91,59	1,38	1,11	0,95	0,89	0,90	0,93	0,97	0,98
109,91	1,21	0,98	0,85	0,79	0,79	0,80	0,82	0,82
128,23	1,10	0,89	0,77	0,70	0,70	0,70	0,72	0,72
146,53	0,99	0,805	0,70	0,63	0,62	0,62	0,63	0,63

8. Je ferai remarquer, en terminant, que les coefficients qui caractérisent les échantillons de nickel soumis à mes expériences décroissent beaucoup plus vite que la densité des tiges, ce qui ne permet malheureusement de rien inférer des nombres trouvés sur le nickel en poudre pour le nickel pur en lingot.

Il existe d'ailleurs une concordance remarquable entre les conclusions de mon étude expérimentale sur le nickel et les résultats correspondants que M. Mascart a déduits de ses recherches sur l'aimantation du fer.

