



HAL
open science

Hystérèse dans les champs tournants

Pierre Weiss, V. Planer

► **To cite this version:**

Pierre Weiss, V. Planer. Hystérèse dans les champs tournants. *J. Phys. Theor. Appl.*, 1908, 7 (1), pp.5-27. 10.1051/jphystap:0190800700500. jpa-00241381

HAL Id: jpa-00241381

<https://hal.science/jpa-00241381>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

JOURNAL DE PHYSIQUE THÉORIQUE ET APPLIQUÉE.

HYSTÉRÈSE DANS LES CHAMPS TOURNANTS ;

PAR MM. PIERRE WEISS et V. PLANER.

Les phénomènes d'hystérèse que l'on observe quand l'aimantation varie en conservant constamment une même direction ont été l'objet de déterminations beaucoup plus nombreuses que ceux dont une matière placée dans un champ tournant est le siège. Et cependant certains aspects dès à présent connus de ce dernier phénomène sont, par leur caractère de simplicité, beaucoup plus encourageants.

Tandis que l'énergie dépensée dans un cycle d'hystérèse alternative⁽¹⁾ croît constamment avec l'induction jusqu'à une valeur maximum correspondant au cycle limite, Baily⁽²⁾ trouva en 1894 que l'énergie dépensée quand une induction constante décrit un tour complet croît d'abord avec l'induction, à peu près comme l'hystérèse alternative, et est supérieure de plus de 50 0/0 à celle-ci jusqu'à $B = 10\,000$; mais, pour $B = 16\,000$ à $17\,000$, elle passe par un maximum et décroît ensuite rapidement, de telle façon que, pour $B = 20\,500$, elle n'est plus que de $1/13$ environ de sa valeur maxima; et sa disparition totale à la saturation n'est guère douteuse.

Pour l'acier, Baily trouva un maximum de l'énergie d'hystérèse tournante⁽¹⁾ pour $B = 14\,000$, à $15\,000$; mais ici la réduction de cette quantité dans le voisinage de la saturation ne put être poussée que jusqu'à $1/5$ environ de sa valeur maxima.

Les expériences de Baily ont été reprises et confirmées par Beat-

(1) Hystérèse alternative, tournante — expressions abrégées, incorrectes, mais commodes.

(2) F.-G. BAILY. *Phil. Trans.*, t. CLXXXVII, p. 715: 1896: — *Electrician*, t. XXXIII, p. 516: 1894.

tie et Clinker⁽¹⁾ sur le fer, puis par Beattie⁽²⁾ sur le nickel et le cobalt. Beattie et Clinker emploient un champ relativement faible, tout juste suffisant, semble-t-il, d'après la représentation graphique de leurs résultats, pour atteindre la réduction à zéro de l'hystérèse. Encore ne l'atteignent-ils qu'à 5 0/0 près de sa valeur maximum, attribuant ce résidu à l'énergie dépensée en courants de Foucault, assez importante dans leur expérience et dont la correction, de leur propre aveu, est assez incertaine. Ils ajoutent, sans autre document, que l'expérience, répétée par une méthode d'observation de position d'équilibre excluant les courants de Foucault, a donné des résultats très voisins de la courbe corrigée. Leur courbe se raccorde tangentiellement à l'axe des inductions au point de disparition de l'hystérèse tournante. Mais Beattie, dans le deuxième travail cité, en reproduisant cette courbe, l'arrête, comme d'ailleurs les nouvelles courbes qu'il obtient pour le nickel et le cobalt, à une distance de cet axe correspondant au quart environ du maximum, et détermine l'intensité d'aimantation à laquelle disparaît l'énergie d'hystérèse en prolongeant rectilignement ces branches descendantes. La loi suivant laquelle se fait l'approche à l'axe des inductions n'est donc pas encore connue.

Grau et Hiecke⁽³⁾ ne se sont pas contentés de comparer, comme Baily, les hystérèses alternative et tournante observées par des méthodes différentes sur des échantillons différents du même fer ; ils ont fait porter, par une méthode ingénieuse, mais indirecte et compliquée, les mesures des deux espèces d'hystérèse sur la même matière. Ils ont trouvé, dans l'intervalle restreint de $B = 0$ à $B = 3\,000$ où ils ont opéré, que l'hystérèse alternative est la moitié de l'hystérèse tournante. Ce résultat a été contesté, et, plus loin, nous aussi arriverons pour ces faibles inductions à une loi différente. Mais nous trouvons à leur méthode et à leur appareil, plutôt que des erreurs de principe, une certaine infériorité pour les déterminations numériques précises provenant de l'incertitude du degré d'uniformité de l'aimantation.

Tel n'est pas l'avis de Dina⁽⁴⁾ et de Herrmann⁽⁵⁾, dont les résultats

(1) BEATTIE et CLINKER, *Electrician*, t. XXXVII, p. 723 ; 1896.

(2) BEATTIE, *Phil. Mag.*, 6^e série, t. I, p. 642 ; 1901.

(3) GRAU et HIECKE, *Sitzungsber. d. k. Akad. zu Wien*, t. CV, p. 933 ; 1896.

(4) DINA, *Electrot. Zeitschr.*, t. XXIII, p. 41, 207 ; 1902.

(5) HERRMANN, *Electrot. Zeitschr.*, t. XXVI, p. 747 ; 1905 : — polémique avec Hiecke, même vol., p. 917 et 1087.

différent de ceux de Grau et Hiecke. Dans les expériences de Dina, l'objet étudié était une bobine de fil de fer isolé qu'il fait tourner dans un champ magnétique. Pour cette disposition de la matière, l'aimantation doit varier, au moins dans les champs faibles, suivant une ellipse très allongée, par suite des phénomènes démagnétisants qui se produisent plus fortement dans la direction perpendiculaire que dans la direction parallèle au fil. Dina trouve l'énergie d'hystérèse tournante un peu *inférieure* (3,8 à 14,70/0) à l'énergie d'hystérèse alternative. Mais ce qui montre bien qu'il n'a pas réellement observé l'hystérèse tournante, c'est que, bien qu'il ait atteint une induction de 18 100, il trouve que l'énergie d'hystérèse croît toujours, alors que Baily a trouvé un maximum pour $B = 16\ 000$ à $17\ 000$.

Quant à Herrmann, le dispositif qu'il emploie, un anneau portant un enroulement composé de deux parties, parcouru par un courant biphasé, ne peut donner lieu à aucun phénomène assimilable, même de loin, à un champ et à une aimantation tournants. Il pense, à la suite de ses expériences, que l'énergie d'hystérèse tournante est sensiblement égale à l'énergie d'hystérèse alternative.

Mentionnons encore Schenkel⁽¹⁾, qui retrouve les résultats de Baily avec une méthode analogue à la sienne. Il constate la réduction à zéro de l'hystérèse tournante à 8 0/0 près, après avoir fait une correction très importante pour éliminer les courants de Foucault (égale au quart environ du maximum de l'énergie d'hystérèse).

En résumé, après les expériences fondamentales de Baily, quelques expérimentateurs ont confirmé ses résultats, d'autres y ont ajouté l'obscurité provenant de leurs polémiques. La question de la loi suivant laquelle l'hystérèse tournante s'approche de zéro et celle du rapport des deux énergies d'hystérèse alternative et tournante dans les champs faibles restent donc ouvertes. Nous avons, en outre, compris dans le programme de ce travail l'étude expérimentale de l'hystérèse alternative et tournante de la pyrrhotine, pour contrôler les formules trouvées précédemment par la mesure des courbes d'aimantation de cette substance.

Méthode expérimentale. — On peut mesurer l'énergie dépensée dans un phénomène d'hystérèse soit indirectement au moyen des cycles d'aimantation, soit directement par une mesure mécanique. Dans le premier cas, elle peut être ou déduite de la mesure

(1) SCHENKEL, *Electrot. Zeitschr.*, t. XXIII, p. 429 : 1902.

de l'aire des cycles ou d'une lecture équivalente au wattmètre. Grau et Hiecke ont eu recours aux cycles d'aimantation relatifs aux deux projections de l'intensité d'aimantation pour en déduire l'énergie d'hystérèse tournante. Herrmann s'est servi du wattmètre, Dina l'a remplacé par une mesure calorimétrique.

La méthode mécanique a été employée par Baily, par Beattie et Clinker, par Beattie, par Schenkel. C'est d'elle que dérivent les hystérésimètres industriels bien connus de Marcel Desprez, d'Ewing, de Blondel-Carpentier. Elle consiste à mesurer le couple C exercé par l'appareil producteur du champ dans son mouvement relatif de rotation par rapport à la substance. En appelant α les angles de rotation du champ, on a pour l'énergie dépensée dans un cycle :

$$E = \int_0^{2\pi} C d\alpha;$$

Beattie a relevé C pour tous les angles de 5° en 5° et en a déduit E .

Lorsque C est constant, il suffit de faire tourner le champ avec une vitesse quelconque et de mesurer C au moyen d'un fil de torsion de constante connue, portant la substance. Lorsque C n'est pas constant, la substance n'étant pas de révolution autour de l'axe de rotation du champ, en général le système suspendu prendra un mouvement vibratoire dont la période sera celle de la rotation du champ, ou dans un rapport simple avec elle; mais l'amplitude de ces vibrations sera d'autant plus petite que les deux systèmes seront plus éloignés du synchronisme. Si l'on peut faire en sorte que ces vibrations soient assez faibles pour que l'on puisse observer une position d'équilibre, le théorème des moments des quantités de mouvement apprend que le couple mesuré par le ressort de torsion sera précisément le couple moyen relatif à toute la circonférence. Multiplié par 2π , il donnera l'énergie d'hystérèse par cycle ⁽¹⁾.

La substance, qui, dans nos expériences, avait toujours la forme d'un disque de faible épaisseur, pouvait être placée debout, le plan du disque parallèle à l'axe de rotation du champ. Mais alors, par suite de la valeur considérable, voisine de 4π , du coefficient démagnétisant relatif à la direction perpendiculaire au plan du disque, l'aimantation reste presque exactement dans le plan du disque et

⁽¹⁾ Voir, pour cette méthode, quand l'intensité d'aimantation n'est pas constante, *J. de Phys.*, 4^e série, t. IV, p. 835; 1905.

est, par conséquent, alternative. Ce n'est que dans les champs très intenses que l'aimantation prendrait des valeurs notables perpendiculairement au plan du disque. Dans le fer, on observerait de nouveau l'hystérèse tournante dans un champ de plus de 20 000 gauss. Nous avons donc pu mesurer l'hystérèse tournante et l'hystérèse alternative sur le même échantillon avec le même appareil et par la même méthode.

Description des appareils. — Nous avons employé dans ces expériences deux appareils. Dans l'un d'entre eux (*fig. 1*), destiné aux

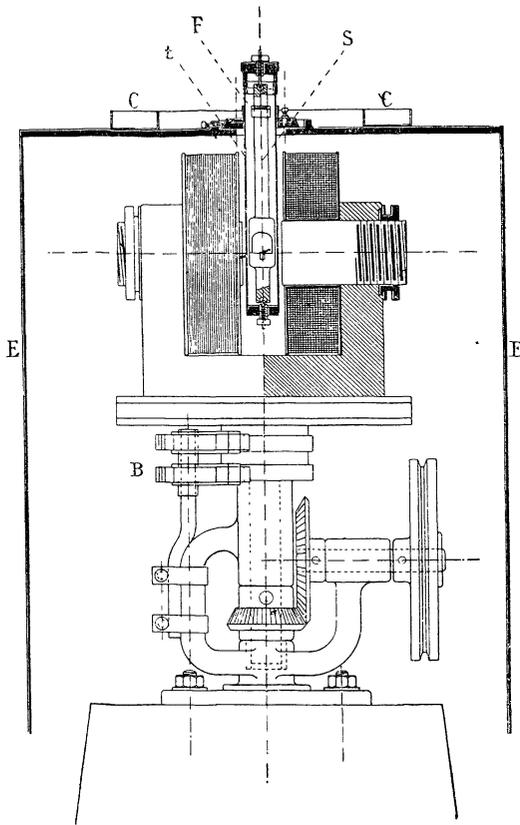


FIG. 1.

champs moyens et intenses, l'appareil producteur du champ est un électro-aimant permettant d'atteindre 10 000 gauss. Le diamètre des

noyaux est de 6 centimètres. Les autres dimensions du circuit magnétique peuvent être relevées sur la figure 1, dessinée à l'échelle de 1 : 7. Les deux bobines portent 2 598 tours de fils de cuivre *émaillé* qui supporte une forte élévation de température. La rotation est obtenue au moyen d'un moteur électrique, par l'intermédiaire d'un train d'engrenages. Le courant est amené à l'aimant par les balais B qui frottent sur des bagues de cuivre. L'intensité du champ a été déterminée en fonction du courant magnétisant au moyen de la balance électromagnétique absolue de M. Cotton ⁽¹⁾.

On ne peut suspendre simplement l'équipage mobile S, portant la substance, à un fil de torsion, car, dans les champs intenses, la pesanteur ne suffit pas pour rendre stable la position d'équilibre dans l'axe de l'aimant, qui est instable en ce qui concerne les forces magnétiques. L'équipage se colle alors contre l'une ou l'autre des surfaces polaires. Pour obvier à cet inconvénient, nous avons d'abord employé deux fils de torsion tendus, fixés à chaque extrémité du support. Mais, même ainsi, les vibrations latérales ne peuvent être réduites et rendues inoffensives que par un centrage très délicat. Comme il s'agit de mesurer des couples assez considérables, nous avons préféré finalement monter le système mobile entre pointes; les pivots en acier sont fixes, et les pierres fines encastrées dans l'équipage mobile. Les expériences sont alors beaucoup plus commodes et les frottements des pivots sont négligeables.

L'équipage S doit être non magnétique, et, pour éviter les courants de Foucault, non conducteur. Après plusieurs essais moins heureux (verre, os), nous nous sommes arrêtés aux supports en bois dur. Le couple antagoniste est fourni par un ressort spiral, placé suffisamment loin du champ pour qu'il n'y ait pas d'inconvénient à le prendre en acier. Les déviations sont lues au moyen d'un miroir placé en regard de la fenêtre F.

Pour éviter l'influence des trépidations, l'appareil était composé de deux parties indépendantes; l'aimant et le mécanisme pour le faire tourner reposaient sur un socle de pierre, et la partie supérieure de l'appareil portant l'équipage mobile était soutenue par des consoles scellées dans un mur épais. L'appareil comprend, en dehors des parties déjà indiquées, un tube de laiton *t*, entourant l'équipage mobile, et l'enveloppe E, qui servent de protection contre les courants

(1) *J. de Phys.*, 4^e série, t. VI, p. 429; 1907.

d'air. Aux faibles vitesses de rotation de l'aimant qui ont été employées, l'effet écran magnétique exercé par ce tube ne pouvait modifier le champ d'une manière appréciable ; pour plus de sûreté, il a été largement échanuré à la hauteur de la substance, et les deux fenêtres qui en résultaient ont été fermées au moyen d'une mince feuille d'aluminium. Ce tube peut être retiré de la douille qui le porte et sur laquelle agissent les vis de réglage et y être réintroduit sans que le centrage soit altéré. On peut ainsi changer le ressort ou changer la substance par les fenêtres sans avoir à recommencer les réglages.

On n'a pas représenté dans la figure un amortisseur formé de deux ailettes en aluminium oscillant dans une cuve annulaire CC' contenant de la glycérine. Cet amortisseur n'est pas nécessaire en principe, l'appareil ayant par lui-même des frottements suffisants pour faire disparaître les mouvements pendulaires. Pour les champs faibles, on s'en est dispensé ; pour les champs intenses, il a été trouvé commode.

Le moteur pouvait être inversé en commutant l'excitation ; on lisait successivement la déviation à gauche et à droite, rendant ainsi l'observation indépendante du zéro de l'appareil.

L'une des plus grandes difficultés de ce genre d'expériences, rencontrée par la plupart des opérateurs, consiste dans les oscillations de l'équipage mobile synchrones avec le mouvement de rotation du champ et causées par l'anisotropie de l'objet étudié autour de l'axe de rotation, que cette anisotropie provienne de la structure interne (cristalline, fibreuse par laminage, etc.) ou de la forme de l'objet. Dans nos mesures d'hystérèse alternative, pour lesquelles le disque était placé debout, cette difficulté se présentait avec une acuité toute particulière. On combat efficacement ces oscillations soit en augmentant la vitesse de rotation du champ, soit en ralentissant les oscillations propres de l'appareil. C'est cette dernière ressource que nous avons surtout utilisée, car l'augmentation de la vitesse de rotation du champ a l'inconvénient d'augmenter les courants de Foucault que nous tenions à rendre presque négligeables pour éviter toute incertitude provenant de leur correction. Pour augmenter la durée d'oscillation de l'appareil, nous nous sommes servis dans quelques expériences de grenaille de plomb que l'on mettait dans deux petites boîtes solidaires du levier de l'amortisseur ; dans d'autres expériences, nous avons employé des cavaliers de plomb que l'on posait sur ces leviers.

Le deuxième appareil, spécialement destiné aux champs faibles, est représenté dans la *fig. 2* (à l'échelle 2 : 7). Il se distingue de celui que nous venons de décrire en ce que l'électro-aimant est remplacé par deux bobines sans fer disposées comme dans la boussole de Helmholtz pour donner un champ uniforme. Chacune des deux bobines porte 239 tours de fil de $0^{\text{mm}},6$. Le courant amené par des balais de charbon frottant sur des bagues de cuivre donne un champ de 32,45 gauss par ampère. Le montage de l'équipage mobile est le même que dans le premier appareil.

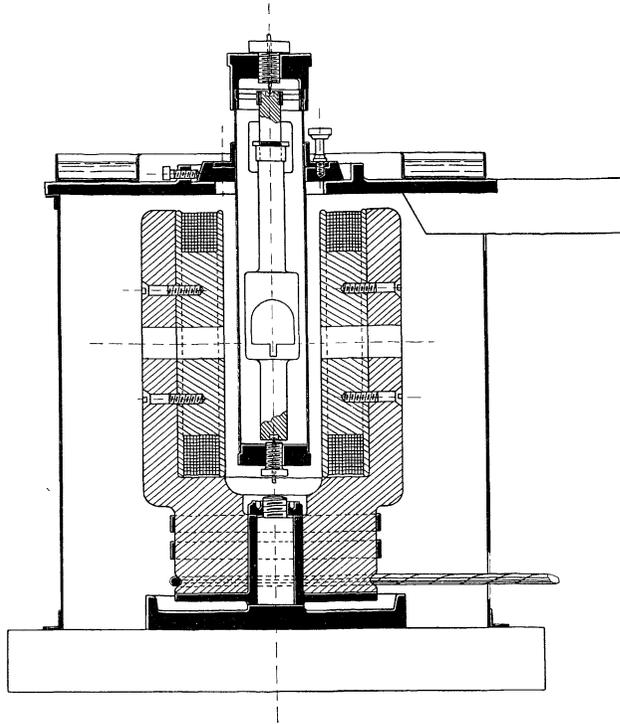


FIG. 2.

Pour ramener l'énergie dépensée par cycle à des valeurs absolues, il était nécessaire de connaître la constante des ressorts employés. Cette détermination a été faite en mesurant la durée d'oscillation du système tel quel et avec une surcharge de moment d'inertie connu. Cette surcharge a été, dans certains cas, un anneau de laiton de sec-

tion rectangulaire; dans d'autres, deux petites masses de plomb disposées symétriquement sur l'amortisseur.

Le choix de la variable indépendante en fonction de laquelle on exprime les énergies d'hystérèse a son importance. On peut hésiter, par exemple, entre la grandeur du champ tournant, l'intensité d'aimantation ou l'induction, puisque, lorsqu'on prend soin de désaimanter pour effacer la trace de l'histoire magnétique antérieure, l'une de ces quantités détermine sans ambiguïté les deux autres. De même, pour repérer un cycle d'hystérèse alternative, il suffira de donner H , B ou I pour le sommet du cycle.

Dans nos expériences, le champ était la quantité immédiatement fournie par l'observation; nous l'avons conservée pour la pyrrhotine, et, pour les autres matières, dans les champs faibles seulement. La discussion des résultats justifiera cette préférence.

Mais on peut objecter à l'emploi de cette variable qu'elle ne met pas en évidence le fait de la saturation; en outre, sa signification physique n'est pas simple, le champ à l'intérieur de la matière différant du champ extérieur, par suite des phénomènes démagnétisants provenant des dimensions limitées de l'objet et, ce qui est plus grave parce que plus inaccessible, par les innombrables phénomènes magnétisants et démagnétisants provenant des discontinuités de la structure cristalline. L'intensité d'aimantation, par contre, a, au moins en tant que valeur moyenne, une signification sans ambiguïté.

Nous avons ramené à cette variable les observations dans les champs intenses en déterminant, par une série de mesures indépendantes, la relation entre I et H . La méthode balistique sous sa forme habituelle, qui consiste à entourer la substance d'un circuit inducteur et d'un circuit induit et à procéder par fermeture et rupture du courant, est impraticable ici. Le flux parasite passant dans la bobine induite à côté de l'échantillon serait beaucoup trop considérable à cause de la minceur de celui-ci. Nous avons donc préféré la méthode qui consiste à placer, dans une forte bobine donnant un champ atteignant un millier de gauss, une bobine induite fixe et à introduire ou à extraire de cette dernière la substance à mesurer. Si la bobine induite a des dimensions telles qu'un courant qui la parcourrait donne un champ sensiblement uniforme dans tout l'espace occupé par la matière, il est clair que l'on mesure ainsi le moment magnétique du corps introduit ⁽¹⁾.

(1) Voir, au sujet de méthodes analogues, *J. de Phys.*, 4^e s., t. IV, p. 475; 1905.

L'appareil est étalonné en valeur absolue en remplaçant l'introduction du corps par celle d'un moment magnétique connu, réalisé au moyen d'une bobine d'aire exactement mesurée, parcourue par un courant connu.

Pour que le phénomène observé fût uniforme dans toute l'étendue de la matière, il faudrait, en toute rigueur, se servir d'ellipsoïdes, pour lesquels le champ démagnétisant est constant. Pour éviter cette complication, nous avons employé les disques relativement grands et minces dans lesquels, au moins dans le voisinage de la saturation, le champ démagnétisant n'a qu'une importance subordonnée par rapport au champ extérieur. Dans ces conditions, sa non-uniformité est sans influence appréciable. Dans les champs faibles dans lesquels toutes les quantités suivent des lois régulièrement croissantes, une certaine non-uniformité des phénomènes ne doit pas altérer notablement le caractère général des courbes. Enfin, cette non-uniformité est la même, qu'il s'agisse de l'hystérèse alternative ou tournante, de sorte que leur comparaison se fait sur des distributions identiques.

RÉSULTATS.

Pyrrhotine. — Nous commençons la description des résultats par la pyrrhotine, pour laquelle ils se présentent à plusieurs points de vue avec un caractère tout particulier de simplicité. Dans un travail antérieur ⁽¹⁾, l'un d'entre nous a déduit de l'étude des courbes d'aimantation de la pyrrhotine dans le plan magnétique les relations suivantes :

$$(1) \quad E_a = 4H_c,$$

$$(2) \quad E_t = 4H_c \sqrt{1 - \left(\frac{H}{H_b}\right)^2}.$$

où E_a représente l'énergie d'hystérèse d'un cycle pour la direction de facile aimantation ;

E_t , l'énergie d'hystérèse dépensée par la rotation d'un champ H dans le plan magnétique ;

I , l'intensité d'aimantation à saturation à la température de l'expérience ;

H_c , le champ coercitif ;

⁽¹⁾ *J. de Phys.*, 4^e série. t. IV, p. 829 : 1905.

H_D , le champ démagnétisant principal, correspondant à la direction de difficile aimantation dans le plan magnétique.

Pour les valeurs de H supérieures à H_D , E_t reste nul.

Il suffit de placer un disque de pyrrhotine, taillé parallèlement au plan magnétique, verticalement et horizontalement dans les appareils à champ tournant (*fig. 1 et 2*) pour obtenir les quantités E_α et E_t (1). La première s'obtient même avec une rigueur plus grande que pour les autres substances, à cause de la grande approximation de la propriété du plan magnétique.

Le travail cité contient déjà une vérification provisoire de ces formules ; malheureusement ces deux quantités n'avaient pu être mesurées sur le même disque par suite d'un accident, et elles n'avaient pas été déterminées en valeur absolue. Dans le tableau I, nous donnons le résultat de nouvelles mesures.

TABLEAU I (pyrrhotine).

H_{gauss}	$E_t \frac{\text{ergs}}{\text{cm}^3}$	$E_\alpha \frac{\text{ergs}}{\text{cm}^3}$
347	4 930	
689	5 740	
1 081	5 540	5 690
1 236	5 480	6 210
2 133	4 660	6 730
2 870	3 930	—
3 360	3 110	7 240
4 265	2 320	—
4 980	1 660	7 240
5 640	1 140	
6 220	640	
6 780	36	
7 220	11	
7 640	0	
8 300	0	
8 500	0	

Les points correspondant à ces expériences ont été marqués dans la *fig. 3*, les courbes en traits pleins ont été tracées d'après les formules (1) et (2) en adoptant les valeurs :

$$4H_c = 7 100 \frac{\text{ergs}}{\text{cm}^3},$$

$$H_D = 7 300 \text{ gauss},$$

(1) Voir *loc. cit.*, p. 835.

qui s'accordent le mieux avec l'ensemble des expériences sur l'hystérèse tournante. Cette valeur de $4H_c I_M$ concorde encore avec celle que donne l'expérience pour l'hystérèse alternative, eu égard à la plus grande difficulté des expériences lorsque le plan magnétique est vertical ⁽¹⁾. Ce n'est que dans les champs faibles, où les champs démagnétisants provenant des dimensions finies de la substance jouent un certain rôle, que les valeurs observées sont inférieures aux valeurs théoriques.

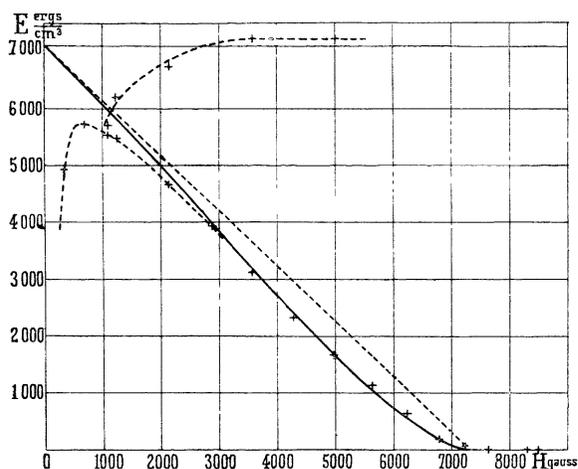


FIG. 3.

Ces expériences ont le grand avantage de donner accessoirement une détermination du champ démagnétisant principal H_D provenant de la structure cristalline, sans que l'on soit obligé de faire l'analyse du groupement de trois cristaux qui se retrouve dans tous les échantillons de pyrrhotine. Nous avons, pour cinq fragments ou disques provenant de divers échantillons, trouvé que l'hystérèse tournante suit la même loi et est exactement réduite à zéro pour la même valeur de $H_D = 7\,300$ gauss.

H_D est donc une constante caractéristique de la pyrrhotine.

Par contre, dans un plus grand nombre d'échantillons, l'hysté-

⁽¹⁾ La valeur *absolute* des énergies d'hystérèse n'a pas été déterminée avec une grande précision. En mesurant indépendamment $H_c = 24$ gauss et $I = 70$ C. G. S., la formule (4) (p. 14) donne $E_a = 6\,700$, ce qui concorde grossièrement.

rière décroît sans s'annuler complètement. Nous donnons dans le tableau II :

TABLEAU II (pyrrhotine).

Hgauss	$E_t \frac{\text{ergs}}{\text{cm}^3}$	$E_a \frac{\text{ergs}}{\text{cm}^3}$
76	2 940	2 170
114	4 100	2 960
155	5 400	3 320
189	5 610	—
304	6 770	4 240
768	8 110	6 670
1 152	7 860	7 500
1 546	7 000	8 200
3 080	4 620	8 940
4 600	2 730	9 310
6 050	850	—
6 680	450	9 160
7 190	370	—
7 420	250	—
7 630	250	—
8 100	250	—
8 660	250	—

les résultats d'expériences sur un échantillon pour lequel, à 7 300 gauss, l'énergie d'hystérèse tournante se réduit à une faible valeur, égale à 2,7 0/0 du maximum et, reste ensuite à peu près constante dans les champs plus élevés. Pour d'autres échantillons, les irrégularités sont plus considérables. Elles s'expliquent soit par des macles irrégulières dont on ne s'aperçoit pas avant l'expérience, soit plus probablement par les changements d'état étudiés dans un travail précédent sous la rubrique *Pyrrhotines anormales* (1).

Champs faibles. — L'étude de l'hystérèse tournante permet de contrôler une autre conséquence des propriétés de la pyrrhotine telles qu'elles ont été déduites de l'étude des courbes d'aimantation. Si ces déductions sont exactes, il ne doit se produire aucun phénomène d'hystérèse dans un champ tournant inférieur au champ coercitif H_c . Dès que ce champ coercitif est dépassé, l'énergie d'hystérèse devrait, pour une matière dont le plan magnétique est horizontal, atteindre de suite la valeur maxima $4IH_c$, si la matière était indéfinie. Comme elle ne l'est pas, les phénomènes démagné-

(1) P. WEISS et J. KUNZ. *J. de Phys.*, 4^e série, t. IV. p. 860 : 1905.

J. de Phys., 4^e série, t. VII. (Janvier 1908.)

tisants doivent intervenir ici, comme ils le font pour limiter l'accroissement de l'intensité d'aimantation, et l'énergie d'hystérèse doit croître à peu près proportionnellement à l'excès du champ sur le champ coercitif. La variation de l'énergie d'hystérèse en fonction du champ (*fig. 4*) doit donc être représentée par les droites OAB.

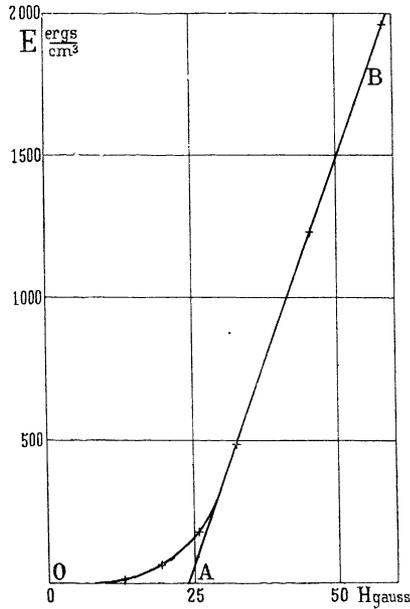


FIG. 4.

Le tableau III et la courbe passant par les points marqués dans la *fig. 4*, qui représentent les observations, montrent que l'expérience confirme les prévisions, à un léger raccord curviligne près.

TABLEAU III.

H _{gauss}	E _t $\frac{\text{ergs}}{\text{cm}^3}$
13,0	13
19,4	63
23,9	178
32,5	485
45,4	1 230
58,4	1 960
71,3	2 730

La courbe permet de se rendre compte que, pour un champ voisin du champ coercitif, l'énergie d'hystérèse n'est que de 2 0/0 de sa valeur maxima.

Dans la comparaison de l'expérience avec la théorie de l'hystérèse du fer, fondée sur le champ moléculaire et les propriétés magnéto-cristallines connexes (¹), on rencontre une divergence analogue.

L'aire des petits cycles d'hystérèse dans lesquels l'amplitude de la variation du champ est inférieure au champ coercitif devrait être nulle d'après la théorie; l'expérience montre qu'elle est différente du zéro. Cet écart trouve une explication plausible dans l'existence de portions de matière, dans le voisinage de la surface extérieure et des surfaces de discontinuité intérieures, pour lesquelles les sphères d'activité moléculaires sont incomplètes et, par suite, les champs coercitifs plus faibles que la valeur normale. Le raccord curviligne (*fig. 4*) entre l'axe des abscisses et la droite AB nous semble devoir s'expliquer de même par les portions de matière de sphère d'activité incomplète.

L'intersection de AB et de l'axe des abscisses donne, dans ces conditions, au lieu du champ coercitif, une quantité légèrement supérieure; on s'en rend compte facilement. Ce champ coercitif approché par excès est, pour cette substance, égal à 24 gauss.

Nickel. — A cause de la petitesse de l'intensité d'aimantation du nickel, comparée à celle du fer, les expériences sur cette matière sont moins sujettes à être altérées par la non-uniformité des champs démagnétisants d'un point à l'autre du disque, et les phénomènes résiduels relativement intenses de cette matière, dont le champ coercitif était $H_c = 17,3$ gauss, rendent les mesures faciles. Le diamètre du disque était de 2 centimètres; son volume, $0^{\text{cm}^3}, 1344$.

Les expériences sur l'hystérèse alternative et la mesure de l'intensité d'aimantation ont été faites dans la direction du laminage et dans la direction perpendiculaire; dans l'une et dans l'autre mesure, les différences sont restées au-dessous de 1 0/0.

Les résultats sont contenus dans les tableaux IV, V, VI et représentés dans les *fig. 5* et 6. On voit, dans la *fig. 5*, qui représente les observations du tableau IV, que l'énergie d'hystérèse tournante, après une période de croissance rapide, atteint un maximum égal à 17 100 ergs par centimètre cube pour une intensité d'aimantation

(¹) *J. de Phys.*, 4^e série, t. VI, p. 670: 1907.

égale à 310 C. G. S. Ensuite elle décroît, la courbe coupant l'axe des abscisses sous un angle fini. Le maximum de l'hystérèse tournante est donné par une déviation mesurée sur l'échelle par 120 millimètres; la déviation restante à l'intensité d'aimantation 488 est de $0^{\text{mm}},2$, quantité qui est dans les limites de l'incertitude des lectures.

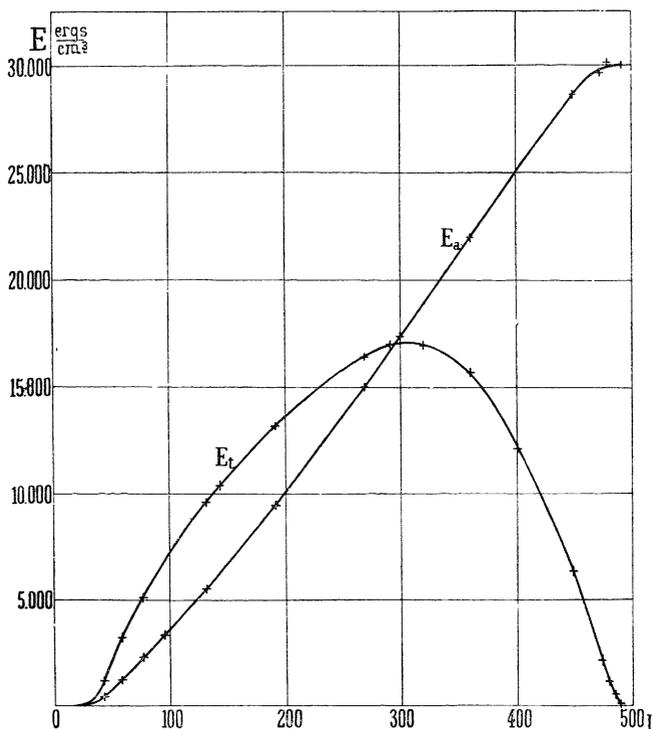


FIG. 5. — Nickel. — Énergie d'hystérèse alternative et tournante en fonction de l'intensité d'aimantation.

Ces observations dans les champs intenses sont corrigées des courants de Foucault. A cet effet, chaque observation a été faite avec des nombres de tours mesurés, voisins de 90 et 160 par minute, et la correction a été faite par la proportionnalité du couple des courants de Foucault avec la vitesse. Cette correction se fait avec régularité. Pour l'hystérèse alternative, elle n'a pas dépassé 3 0/10 de la valeur maxima; pour l'hystérèse tournante, à la disparition, elle avait le quart de cette valeur.

L'hystérèse alternative est d'abord inférieure à l'hystérèse tournante, mais les deux courbes se coupent au maximum de cette dernière, et l'hystérèse alternative atteint une valeur presque double de ce maximum, comme l'avait déjà trouvé Baily pour le fer. Nous avons déjà fait remarquer que, pour le nickel dans les champs intenses (2000 gauss), l'hystérèse observée quand le disque est debout n'est plus purement alternative, mais présente une forte ellipticité, et devrait par conséquent décroître après le passage par un maximum. Quelques observations semblaient indiquer cette décroissance, mais déjà au maximum la stabilité de l'appareil était tout juste suffisante; nous n'avons pu poursuivre avec certitude des expériences sur l'hystérèse alternative dans les champs plus intenses que ceux qui font disparaître l'hystérèse tournante.

TABLEAU IV. — *Nickel, champs intenses.*

H _{gauss}	I _{c.g.s.}	E _t $\frac{\text{ergs}}{\text{cm}^3}$	E _a $\frac{\text{ergs}}{\text{cm}^3}$
72	144	9 810	6 260
97	192	12 930	9 630
145	269	16 380	14 930
244	360	15 780	21 950
486	448	6 410	28 670
732	474	2 080	29 540
976	478	1 020	30 080
1 464	486	630	—
1 950	488	46	31 590
2 923	—	30	—

Deux séries d'expériences (tableaux IV et V) ont été faites dans des champs plus faibles, au moyen de l'appareil *fig.* 2, avec des ressorts de sensibilités différentes.

TABLEAU V. — *Nickel, champs moyens.*

H _{gauss}	I _{c.g.s.}	E _t $\frac{\text{ergs}}{\text{cm}^3}$	E _a $\frac{\text{ergs}}{\text{cm}^3}$	$\frac{E_t}{E_a}$
24,3	41,6	1 090	390	2,79
32,5	59,0	3 190	1 150	2,77
40,6	77,5	5 070	2 280	2,22
48,7	95,4	6 810	3 260	2,09
64,9	131,2	9 540	5 490	1,74
97,3	191,0	13 030	9 460	1,38

TABLEAU VI. — *Nickel, champs faibles.*

H _{gauss}	I _{c.g.s.}	E _t $\frac{\text{ergs}}{\text{cm}^3}$	E _a $\frac{\text{ergs}}{\text{cm}^3}$	$\frac{E_t}{E_a}$
9,7	8,0	11,2	3,1	3,62
16,2	28,2	164	47,8	3,43
19,5	30,8	362	105,0	3,44
24,3	41,6	1 020	330	3,09
26,0	45,2	1 290	427	3,02

La représentation graphique de ces tableaux aurait une physionomie tout à fait semblable, et pour des raisons analogues, à celle des résultats obtenus avec la pyrrhotine dans les champs faibles. La dernière colonne montre que le rapport $E_t : E_a$ n'a pas la valeur constante égale à 2 que lui attribuaient Grau et Hiecke. Ce rapport part

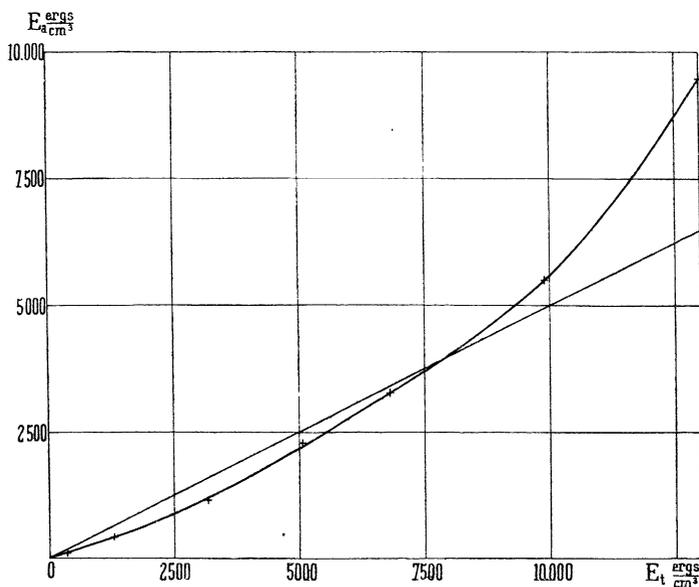


FIG. 6. — Nickel. — Énergie d'hystérèse alternative en fonction de l'énergie d'hystérèse tournante (dans les champs faibles).

d'une valeur voisine de 4 pour s'abaisser progressivement. La *fig. 6*, dans laquelle nous avons porté en abscisses E_t et en ordonnées E_a , met encore mieux en évidence la variation systématique de ce rapport, et la droite $E_t = 2E_a$, tracée dans la même figure, montre comment on a pu, avec des expériences moins exactes et faites dans un intervalle restreint, être conduit à la conclusion de ces auteurs.

Fer doux. — Le disque de fer doux, de 2 centimètres de diamètre, a été découpé dans une tôle mince. Son volume est de $0^{\text{cm}^3},0454$. Le champ coercitif est 2,3 gauss.

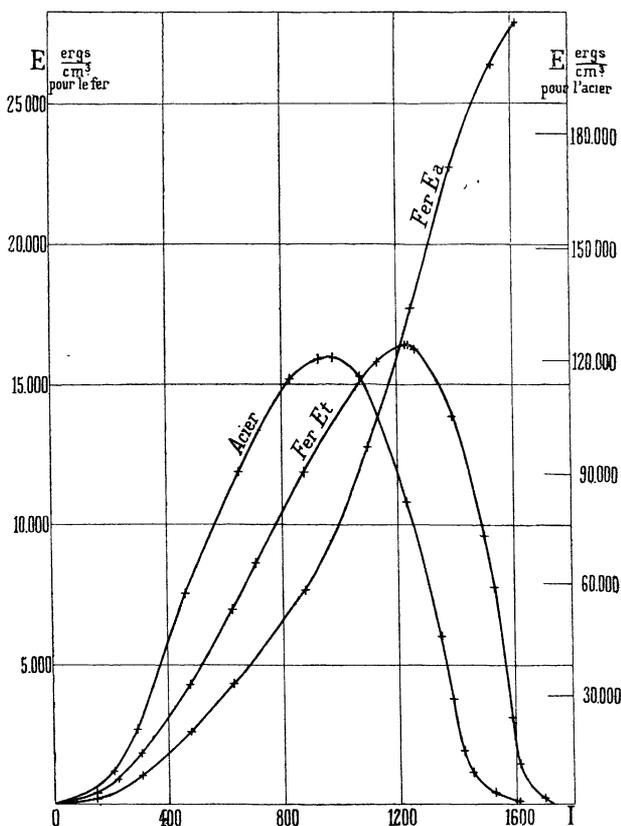


FIG. 7. — Fer doux et acier.

Les résultats sont très analogues à ceux du nickel. Ils sont contenus dans les tableaux VII et VIII, représentés par les courbes *fig. 7*. L'hystérèse tournante passe par un maximum, égal à 16 400 ergs par centimètre cube et par cycle pour $I = 1\ 220$ environ, et se réduit à zéro suivant une branche de courbe s'approchant plus progressivement de l'axe des abscisses que pour le nickel. A $I = 1\ 700$, la déviation restante est de $0^{\text{mm}},2$, le maximum de l'énergie d'hystérèse tournante étant donné par 40 millimètres.

La correction des courants de Foucault a été faite en observant successivement à 110 et à 190 tours par minute; le maximum de cette correction a été, pour l'hystérèse tournante, de 4 0/0 environ de sa valeur maximum.

Les propriétés de ce fer laminé étaient assez différentes suivant deux directions rectangulaires. Les différences entre l'énergie d'hystérèse alternative dans la direction du laminage et dans les directions perpendiculaires ont atteint 15 0/0; on a pris la moyenne.

De même l'intensité d'aimantation a été mesurée dans deux azimuts rectangulaires. La différence atteignait à peine 1 0/0 dans les champs moyens et disparaissait dans les champs intenses.

TABLEAU VII. — *Fer doux, champs faibles.*

Hgauss	I _{c.g.s.}	E _t $\frac{\text{ergs}}{\text{cm}^3}$	E _a $\frac{\text{ergs}}{\text{cm}^3}$	$\frac{E_t}{E_a}$
16,2	144	400	210	1,9
24,3	226	870	440	2,0
32,4	309	1 830	1 060	1,73
48,7	472	4 210	2 590	1,63
64,9	622	6 860	4 260	1,61
81,1	774	9 000	6 300	1,43

TABLEAU VIII. — *Fer doux, champs intenses.*

Hgauss	I _{c.g.s.}	E _t $\frac{\text{ergs}}{\text{cm}^3}$	E _a $\frac{\text{ergs}}{\text{cm}^3}$
72,1	700	8 620	4 860
97,0	874	11 800	7 590
145,4	1 128	15 680	17 680
292,3	1 392	13 280	22 580
486,0	1 531	7 680	26 260
732,0	1 591	3 010	—
976,0	1 612	1 450	27 750
1 950	1 700	240	32 090
2 923	—	84	—
3 900	—	76	—

L'énergie d'hystérèse alternative est d'abord inférieure à celle de l'hystérèse tournante, puis les deux courbes se coupent sensiblement au maximum de l'énergie d'hystérèse tournante, et l'énergie d'hystérèse alternative s'approche, dans les champs intenses, du double du maximum de l'énergie d'hystérèse tournante.

Les mesures dans les champs très faibles étant un peu moins précises pour le fer, à cause de la petitesse des quantités à mesurer,

nous ne les reproduisons pas ici. Elles ont montré que le fer se comporte sensiblement comme le nickel.

Fer électrolytique. — Pour établir par un deuxième exemple la loi de l'hystérèse dans les champs faibles, nous avons eu recours au *fer électrolytique* :

Diamètre du disque.....	19 ^{mm} ,9
Épaisseur.....	0 ^{mm} ,0252
Volume.....	0 ^{cm} 3,00784
Champ coercitif.....	9 ^{gauss} ,26

Le fer était déposé sur un disque de cuivre. Les valeurs *absolues* contenues dans les tableaux suivants sont incertaines, par suite de l'incertitude sur l'épaisseur de la couche.

TABLEAU IX. — *Fer électrolytique, champs faibles.*

Hgauss	I _{c.g.s.}	E _t $\frac{\text{ergs}}{\text{cm}^3}$	E _a $\frac{\text{ergs}}{\text{cm}^3}$	$\frac{E_t}{E_a}$
9,72	130	2 270	6 75	3,38
12,96	214	5 100	1 482	3,43
16,22	280	8 900	2 700	3,31
22,72	420	14 900	6 520	2,27

TABLEAU X. — *Fer électrolytique, champs moyens.*

Hgauss	I _{c.g.s.}	E _t $\frac{\text{ergs}}{\text{cm}^3}$	E _a $\frac{\text{ergs}}{\text{cm}^3}$	$\frac{E_t}{E_a}$
16,2	282	8 700	2 740	3,22
22,7	412	15 000	6 410	2,34
32,5	580	22 000	9 800	2,24
40,6	657	26 900	15 600	1,72
64,9	780	36 100	23 100	1,56
97,4	899	43 400	35 000	1,24
129,8	975	44 500	42 200	1,05
162,2	1 018	40 500	51 800	0,78

Ces résultats sont de tous points conformes à ceux que nous avons trouvés pour le nickel et en contradiction, par conséquent, avec la loi simple de Grau et Hiecke.

Acier. — Les résultats obtenus sur un disque d'acier au tungstène, taillé dans un aimant en fer à cheval employé dans les sonneries magnéto-électriques des installations téléphoniques, sont contenus dans les tableaux XI et XII.

TABLEAU XI. — *Acier, champs moyens, appareil fig. 2.*

Hgauss	I _{c.g.s.}	E _t $\frac{\text{ergs}}{\text{cm}^3}$	E _a $\frac{\text{ergs}}{\text{cm}^3}$
16,2	40	80	40
24,3	63	270	100
32,5	83	610	210
40,6	108	1 350	470
48,7	132	2 760	890
64,9	182	6 830	2 140
97,3	288	20 440	6 890
129,8	398	44 090	15 290
162,2	462	—	27 080

Dans les champs intenses nécessaires pour obtenir la saturation de l'acier, l'obtention d'une position d'équilibre pour le disque placé verticalement était très délicate, et la mesure de l'hystérèse alternative n'a pu être poussée jusqu'à la saturation.

Le tableau XII ne contient donc que l'énergie d'hystérèse tournante.

TABLEAU XII. — *Acier, champs intenses, appareil fig. 1.*

Hgauss	I _{c.g.s.}	E _t $\frac{\text{ergs}}{\text{cm}^3}$
72	201	8 640
97	286	20 390
145	460	55 330
195	649	89 670
244	830	114 670
390	1 140	105 860
486	1 230	81 820
732	1 350	45 710
976	1 385	28 900
1 464	1 420	14 490
1 950	1 452	8 510
2 920	1 530	3 310
3 900	1 610	1 130
4 830	—	280

L'hystérèse tournante a été mesurée avec les nombres de tours de 110 et 170 par minute pour la correction des courants de Foucault ; cette correction est à peine supérieure à 1 0/0 du maximum de l'hystérèse tournante.

Comme pour le fer, l'hystérèse alternative et l'intensité d'aimantation ont été trouvées légèrement différentes pour deux azimuts rectangulaires ; on a pris la moyenne.

La courbe représentant la variation de l'énergie d'hystérèse tournante est représentée dans la figure des courbes du fer (*fig. 7*). Ici aussi l'énergie d'hystérèse tournante tend vers zéro; mais, plus encore que pour le fer, la courbe s'approche progressivement de l'axe des abscisses. La raison en est sans doute dans la non-homogénéité de l'acier, dont les différents éléments constitutants arrivent successivement à l'intensité d'aimantation correspondant à la perte de l'hystérèse. Cette réduction à zéro est d'ailleurs aussi complète que pour les autres matières. Le résidu observé correspond à 0^{mm},9, dont on ne peut répondre, le maximum étant donné par 376 millimètres.
