Étude de l'aimantation des corps ferromagnétiques au-dessus du point de Curie

Pierre Weiss, G. Foex

▶ **To cite this version:**

Pierre Weiss, G. Foex. Étude de l'aimantation des corps ferromagnétiques au-dessus du point de Curie. J. Phys. Theor. Appl., 1911, 1 (1), pp.744-753. 10.1051/jphystap:0191100109074401 . jpa-00241720

HAL Id: jpa-00241720
https://hal.science/jpa-00241720

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.

ÉTUDE DE L'AIMANTATION DES CORPS FERROMAGNÉTIQUES AU-DESSUS DU POINT DE CURIE (1)

Par MM. PIERRE WEISS et G. FOEX.

Magnétite. — Les expériences ont porté sur trois échantillons de magnétite artificielle, préparée en grillant au chalumeau à oxygène et gaz d'éclairage de l'oxyde de fer Fe^2O^3 chimiquement pur. A haute température cet oxyde perd de l'oxygène en donnant de la magnétite.

On évite la réoxydation aux températures peu élevées en enfermant les échantillons dans des enveloppes de platine que l'on soude ensuite au chalumeau. Une tige soudée à l'enveloppe permet de fixer le tout au tube de silice.

Deux des échantillons (1 et 2), qui avaient probablement été maintenus en fusion pendant un temps trop court, pour chasser tout l'oxygène en excès, ont donné des résultats irréguliers aux températures supérieures à 700°. On trouvait bien en apparence une courbe unique pour représenter χ en fonction de T, mais cette courbe se déplaçait d'une série d'expériences à l'autre.

Les résultats donnés par l'échantillon 2 qui, au-dessous de 700, se placent sur une courbe unique et concordent avec ceux de l'échan-

(1) Communication faite à la Société française de Physique, séance du 3 mars 1911, voir ce vol. p. 274.

Article published online by EDP Sciences and available at http://dx.doi.org/10.1051/jphystap:0191100109074401

tillon 3 ont été conservés. Ce dernier échantillon a été préparé avec plus de soin. On a maintenu la fusion jusqu'à cessation complète du dégagement d'oxygène. Aussi a-t-il toujours donné des résultats concordants.

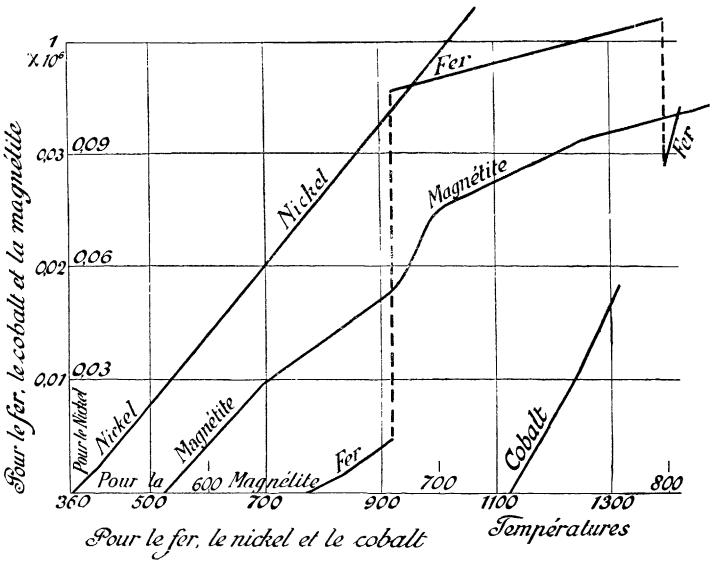

FIG. 1.

Les résultats ont été représentés dans la *fig.* 1, dans laquelle les températures ont été portées en abscisses et les inverses des coefficients d'aimantation spécifique en ordonnées (1). On obtient ainsi une ligne droite toutes les fois que la loi théorique :

$$\chi(t - \theta) = C$$

est satisfaite, et la constante de Curie C est l'inverse du coefficient angulaire de la droite.

La *fig.* 1 montre que les observations se placent sur quatre droites successives dont la première et la seconde ainsi que la troisième et la quatrième se juxtaposent exactement, tandis que le passage de la seconde à la troisième se fait par une région de transition d'une trentaine de degrés, dans laquelle la courbe a un point d'inflexion.

(1) Voir, pour la reproduction détaillée des résultats des mesures, *Archives des sc. phys. et nat.*, 4e période, t. XXXI, p. 89; Genève, 1911.

Nous désignerons les régions analogues que nous rencontrerons à plusieurs reprises dans la suite par la lettre ψ. Ces quatre droites caractérisent quatre états de la magnétite.

Nos mesures s'arrêtent à 900°. Les tentatives que nous avons faites pour les étendre au delà n'ont pas été satisfaisantes; les différentes séries de mesures faites avec les différents échantillons, ou aussi avec le même, donnant des droites à peu près parallèles entre elles, mais nettement déplacées les unes par rapport aux autres. Peut-être cela est-il dû à des faux équilibres entre différents états physiques de la matière. Les expériences de Curie, sur lesquelles on reconnaît la trace des mêmes complications, s'étendent jusqu'à 1.360°. D'après lui, aux températures les plus élevées, la substance est purement paramagnétique avec un coefficient d'aimantation spécifique inversement proportionnel à la température absolue. En adoptant les mesures de Curie, avec lesquelles les quelques déterminations que nous avons faites dans la même région s'accordent suffisamment, jusqu'à ce que la cause des irréversibilités thermiques ait été élucidée, on serait amené à ajouter au diagramme une cinquième droite qui passerait par le zéro absolu. Les données concernant ces cinq droites sont réunies dans le tableau suivant :

TABLEAU I

Intervalle de température	Point de Curie (température absolue)	Constante de Curie
581° — 622°	581° + 273°	0,00445
622 — 680	558 + 273	0,00682
680 — 710 (Région ψ)	—	—
710 — 770	433 + 273	0,0105
770 — 900	194 + 273	0,0180
900 — 1360 (Curie)	0	0,028

Ces données ont été déterminées graphiquement. Remarquons encore que les expériences de Curie, qui étaient trop écartées et trop peu précises pour lui permettre de reconnaître les changements de caractère du phénomène, donnent du côté des températures les plus basses une constante $C = 0{,}00456$, qui concorde bien avec la nôtre 0,00445, quoique le point $\vartheta = 537° + 273°$, trouvé par Curie soit notablement plus bas.

Nickel. — Les mesures ont été faites sur un échantillon de nickel pur de Merck. Il était taillé sous forme d'ellipsoïde et fixé sur le tube de silice au moyen d'un collier d'argent. Le grand axe de l'ellipsoïde était dans le prolongement du tube (normal au champ).

Les expériences à basses températures ont été faites dans un four à chemise de cuivre. Pour les températures plus élevées, on s'est servi du four en nickel, puis d'un four en platine.

Les résultats ont été les suivants :

En portant $1 : \chi$ en fonction de t, on obtient une première partie rectiligne coupant l'axe des températures à 364°, et représentant les expériences jusqu'à 412°. La constante de Curie qui lui correspond est environ 0,0066. Ce n'est sans doute pas un intervalle dans lequel la constante de Curie a une valeur déterminée, mais le commencement d'une région de transition dont l'existonce a été reconnue par des expériences spéciales sur les propriétés dans le voisinage immédiat du point θ.

Une deuxième droite, qui coupe la première à 412°, en faisant avec elle un petit angle et se prolonge jusqu'à 870°, est caractérisée par $C = 0{,}0053$ et $\theta = 372°$, déterminés graphiquement.

Une dernière série d'expériences a été faite très rapidement dans le four en platine : elle avait pour but de rechercher d'une façon tout à fait qualitative si la droite précédente se prolonge encore à haute température. Tous les points de cette dernière série sont un peu déplacés par rapport aux précédents vers les hautes températures, probablement par suite d'un réglage défectueux. La valeur moyenne du produit $\chi (t - \theta)$ pour ces dernières expériences est de 0,00372, c'est-à-dire de 2,5 0/0 supérieur à celle des expériences précédentes. Mais ce produit a sensiblement la même valeur pour le point à 712°, pris dans la région commune et pour le point extrême à 1.102°. Il est donc extrêmement probable que le même état de la matière persiste sans l'apparition d'aucun phénomène nouveau jusqu'au delà de 1.100°. La grande étendue de cet intervalle à propriétés constantes est extrêmement remarquable.

Fer. — On s'est servi, pour les mesures sur le fer, de deux échantillons. Le premier, destiné à l'étude du voisinage du point de transformation, où les attractions sont très fortes, était un petit cylindre pesant $0^{gr},1176$. Le deuxième était un ellipsoïde du même fer (électrolytique Merck) ; il pesait $0^{gr},4682$ et a servi pour les mesures à haute température.

Quand on porte (*fig.* 1) $1 : \chi$ en fonction de la température, on trouve des droites comme pour les corps précédents, avec la différence que, pour le fer, il y a deux discontinuités aux températures de 920° et 1.395°. Ces températures séparent la première, les régions

du fer β et du fer γ d'Osmond, et la seconde, celles du fer γ et du fer δ, ainsi appelé par extension de la même nomenclature, dans laquelle la désignation du fer α est réservée à l'état fortement magnétique au-dessous du point de Curie.

Il avait semblé possible de généraliser ces désignations en les étendant à tous les corps passant aux diverses températures par différents états magnétiques, et notamment d'appeler d'une manière générale région γ, toute région de paramagnétisme pur caractérisée par un coefficient d'aimantation inversement proportionnel à la température absolue, comme Curie avait pensé que ce fût le cas pour le fer γ. Nos expériences ayant mis hors de doute que celui-ci se comporte en réalité d'une manière différente, il vaut mieux limiter l'emploi de ces notations α, β, γ, δ, au fer et à ceux de ses alliages où la continuité des propriétés exclut toute ambiguité et distinguer, pour les corps magnétiques, les régions de ferromagnétisme spontané, de ferromagnétisme sollicité par un champ extérieur et de paramagnétisme.

I. *Région* β. — La région β s'étend depuis le point de Curie ($\theta = 774°$) jusque vers 920°.

Deux séries, faites avec des échantillons différents, l'une en faisant baisser la température et l'autre en la faisant monter, ont donné des résultats concordants. La courbe obtenue se compose de deux portions de droites. La première représente les expériences entre 774° et 828°; elle fournit une constante de Curie égale à 0,0393 et un point θ situé à 774°. Dans cette région, que nous appellerons β_1, le coefficient d'aimantation spécifique varie suivant la loi :

$$\chi(t - 774) = 0{,}0393.$$

La constante de Curie 0,0393 n'est pas très bien déterminée parce que l'intervalle de température qui lui correspond est très petit (35°) et parce que, dans cette région, les attractions sont déjà un peu grandes pour l'appareil.

Entre 828° et 920°, région β_2, le coefficient d'aimantation spécifique est donné par :

$$\chi(t - 790) = 0{,}0273.$$

Nos expériences montrent donc bien quel est le caractère des deux régions dont Curie a le premier reconnu l'existence dans le fer β.

Les expériences de Curie, dans la région β, conduisent à un point θ

notablement plus bas que le nôtre (746° au lieu de 774°). Cet écart peut provenir de plusieurs causes : Curie se servait d'un four à noyau de porcelaine, dans lequel la température est loin d'être uniforme ; il dit lui-même que les températures les plus élevées ne sont pas sûres à plus de 10° ou 20° près. D'autre part, les échantillons de Curie contenaient tous un peu de carbone qui pouvait abaisser les points de transformation magnétique. La valeur de la constante C que l'on peut déduire des expériences de Curie est un peu incertaine : suivant l'intervalle de température que l'on envisage et suivant l'échantillon, on trouve des valeurs échelonnées entre 0,034 et 0,041. Pour la deuxième portion de droite, on peut hésiter entre 0,016 et 0,026.

II. *Région* γ. — Quand on fait monter la température un peu au-dessus de 920° et qu'on la maintient ensuite constante, le coefficient d'aimantation spécifique diminue en fonction du temps et d'autant plus vite que la température est plus élevée. A 922°, ce coefficient met une demi-heure à passer de $90 . 10^{-6}$ à $60 . 10^{-6}$, tandis qu'à 940° il suffit d'un quart d'heure pour passer de $150 . 10^{-6}$ à $28 . 10^{-6}$. La valeur limite semble être à 940° voisine de $28 . 10^{-6}$. Si l'on fait, au contraire, baisser la température à partir de 940°, les mêmes phénomènes se produisent en sens inverse ; le coefficient augmente et tend vers une valeur limite qui est atteinte d'autant plus vite que la température est plus basse. Vers 920°, le coefficient d'aimantation passe de $28 . 10^{-6}$ à $210 . 10^{-6}$ environ.

Il semble bien d'après cela que les fers β_2 et γ se comportent comme deux phases en équilibre. Si la température, au lieu de rester invariable pendant toute la transformation, continue à se modifier quand on fait varier le courant de chauffage, cela peut tenir à ce que le couple ne touche pas la substance et que les différences de températures avec l'enceinte ont pour effet de fournir la chaleur latente nécessaire à la transformation. Mais il se produit plus probablement quelque chose d'analogue aux retards à l'établissement de l'équilibre dans une solution de sucre en contact avec de gros morceaux.

Au-dessus de 920°, la concordance des expériences n'est plus très bonne, par suite de la difficulté qu'il y a à préserver le fer de l'oxydation. Il est possible, cependant, d'affirmer que la variation de $1 : \chi$ est sensiblement linéaire en fonction de la température, mais que la droite est moins inclinée sur l'axe des températures que ne l'exige-

rait une susceptibilité inversement proportionnelle à la température absolue.

Nos expériences sur la région γ du fer conduisent donc à une conclusion différente de celle à laquelle Curie avait cru pouvoir s'arrêter. La susceptibilité décroît plus lentement que l'inverse de la température absolue. Le fer γ se comporte comme un corps ferromagnétique dont le coefficient du champ moléculaire serait négatif et où, par conséquent, le champ moléculaire serait démagnétisant au lieu d'être magnétisant. C'est la première fois que l'on est amené à donner ce signe au champ exercé sur une molécule magnétique par l'ensemble de celles qui forment sa sphère d'action moléculaire, mais il ne semble pas qu'il puisse y avoir d'objection de principe à cela.

La faible inclinaison de la droite empêche de donner des valeurs numériques exactes pour la constante et la température du point de Curie, mais on peut les évaluer grossièrement à :

$$C = 0{,}072 \qquad \theta = -1.340 \text{ abs.}$$

III. *Région* δ. — La droite de la région γ se prolonge jusque vers 1.395°. A cette température, une nouvelle transformation brusque se produit. Le coefficient d'aimantation passe de $24,1.10^{-6}$ à $35,1.10^{-6}$. Il recommence ensuite à décroître très rapidement.

La température du passage a pu être observée directement. On laisait monter lentement la température en suivant les déplacements du trait lumineux fourni par le miroir de l'équipage mobile. A 1.396°, la déviation de ce trait a passé de 67 millimètres à 97 millimètres, ce qui correspond (toutes corrections faites) aux susceptibilités indiquées plus haut.

On a pu mesurer ensuite les susceptibilités suivantes :

$t = 1.401°$	$\chi . 10^6 = 33{,}24$
1.421°	30,09

Pour dépasser 1.400°, il a fallu remplacer le tube de silice, qui se courbait quoique peu chargé à l'extrémité, par un tube de porcelaine prolongé par une tige d'iridium. Une autre difficulté des mesures de température est la dévitrification de la silice : sous l'action de l'atmosphère d'hydrogène maintenue dans le four, le quartz cristallise et devient très fragile.

La correction du magnétisme du nouveau support est très faible

(1,5 0/0); elle a été évaluée par une mesure directe à haute température.

La température de la transformation $\gamma\delta$ indiquée par Curie est beaucoup plus basse que la nôtre. Cela tient, en partie, à ce qu'il s'est servi, pour étalonner son couple thermoélectrique, du point de fusion du palladium pour lequel on indiquait, à l'époque où il a fait ses mesures, une température beaucoup trop basse (1.500° au lieu de 1.587).

Curie avait pensé que dans la région δ le fer avait pris un nouvel état paramagnétique; malgré leur peu d'étendue, nos mesures permettent d'affirmer que la décroissance de la susceptibilité est beaucoup plus rapide que celle de l'inverse de la température absolue. On peut évaluer grossièrement les constantes de cette région à :

$$C = 0{,}0045, \qquad \theta = +\,1\,230 + 273°.$$

Enfin, si nos *conclusions*, qui serrent de plus près les expériences, diffèrent de celles de Curie, nos *mesures* s'accordent suffisamment avec les siennes pour en recevoir une importante confirmation.

Cobalt. — Le point de Curie du cobalt étant très élevé, les mesures n'ont pu porter que sur un intervalle restreint de températures. Elles ont été faites sur un échantillon de métal pur pesant $0^{gr},4118$.

Les expériences ont été représentées dans la *fig.* 1. Elles donnent lieu à deux portions de droites dont la première, de 1.170° à 1.241°, est caractérisée par :

$$C = 0{,}0217, \qquad \theta = 1.131 + 273.$$

et la seconde, de 1.241° à 1.303°, limite des expériences, par :

$$C = 0{,}0182, \qquad \theta = 1.149 + 273°.$$

Le premier point, à 1.156°, est en dehors de la première droite. Il n'y a pas de raison pour suspecter particulièrement l'exactitude de ce point qui a été mesuré deux fois. Il est donc fort possible que, comme pour le nickel, il y ait, avant la région du ferromagnétisme spontané, une région de transition et un nouveau point θ situé encore plus bas. On l'admettra d'autant plus volontiers que des mesures encore inédites dans la région du ferromagnétisme spontané indiquent un point de Curie situé dans le voisinage de 1.110°.

Pyrrhotine. — Deux échantillons ont été examinés. Ils proviennent

tous deux d'un cristal de Morro Velho, comme toutes les pyrrhotines normales précédemment étudiées (1).

Leur coefficient d'aimantation a été mesuré pour les directions du plan magnétique soit parallèle, soit perpendiculaire au champ magnétique.

Dans tous les cas, la pyrrhotine a donné un résultat très particulier : son coefficient d'aimantation semble ne pas varier avec la température.

Les expériences ont donné les nombres suivants :

TABLEAU II

Échantillon 1 (masse = 0,3374 gr.)

Plan magnétique parallèle au champ et perpendiculaire au déplacement.

Températures t	$\chi \cdot 30^6$
336	24,1
344	24,6
322	25,5

Plan magnétique perpendiculaire au champ.

330	25,1
350	25,1
318	25,9 à 32,8

Plan magnétique parallèle au champ et au déplacement.

327	26,0
348	26,1
362	25,5
371	26,1
404	26,1
476	34,8

Échantillon 2 (masse = 0,5160).

334	18,9
350	19,2

La légère augmentation que l'on observe pour le coefficient d'aimantation pourrait bien être due à un commencement d'altération donnant un oxyde, plus magnétique que la pyrrhotine. On voit, en effet, que χ prend une valeur plus grande à chaque nouvelle série d'expériences (à chaque nouvelle chauffe, par conséquent) et qu'il ne reprend pas sa valeur initiale quand on fait baisser la température.

(1) *J. de Phys.*, 4e série, IV, p. 469, 829, 847 (1905) ; *Arch. des Sc. phys. et nat.*, juin et sept., 1905.

La pyrrhotine ne permet donc pas de constater l'existence d'une région de ferromagnétisme sollicité par le champ extérieur, ayant le même caractère que pour les autres corps. Il est à peine possible qu'elle existe dans le voisinage immédiat du point θ qui, d'après nos expériences, semble être à 318° et qui, par d'autres expériences directes non publiées, a été trouvé à 319°. Cette manière d'être de la pyrrhotine, qui, sous d'autres rapports, s'accorde si bien avec la théorie, est assez énigmatique. (*A suivre*).