

**Zeitschrift:** Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft = Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles = Atti della Società Elvetica di Scienze Naturali

**Herausgeber:** Schweizerische Naturforschende Gesellschaft

**Band:** 86 (1903)

**Artikel:** Les nouvelles ferromagnétiques de la Pyrrhotine

**Autor:** Weiss, P.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-90107>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 15.04.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## Les nouvelles propriétés ferromagnétiques de la Pyrrhotine.

par P. Weiss,

professeur à l'École polytechnique de Zurich.

---

En abordant ici la description forcément très brève de quelques phénomènes nouveaux, rencontrés dans l'étude de la pyrite magnétique ou pyrrhotine, mon intention ne saurait être de donner un exposé détaillé des mesures déjà nombreuses faites sur ce cristal ni même de décrire les méthodes expérimentales qui ont été employées. Je me bornerai donc à faire ressortir quelques particularités caractéristiques.

Bien que l'anisotropie cristalline semble à première vue introduire une grande complication, les premières recherches faites sur le magnétisme et le diamagnétisme des cristaux sont empreintes d'une simplicité relative.

Rappelons d'abord que l'étude de l'aimantation d'une substance peut être définie comme la détermination de l'intensité d'aimantation, c'est-à-dire du moment magnétique de l'unité de volume lorsque l'on donne toutes les valeurs possibles au champ magnétique dans lequel la substance est placée. Or dans les substances faiblement para- ou diamagnétiques il y a un rapport constant entre le champ et l'aimantation qu'il produit. Lord KELVIN a montré qu'en généralisant cette propriété et en introduisant, à la place de ce rapport constant unique, trois coefficients constants relatifs à trois axes rectangulaires convenablement choisis dans le cristal, on pouvait édifier une théorie embrassant l'ensemble des phénomènes magnéto-cristallins, et contenant notam-

ment la proposition suivante que j'énoncerai ici à cause de son caractère intuitif: Lorsqu'un champ de grandeur constante et de direction variable est représenté successivement par les divers rayons d'une sphère, l'aimantation est représentée en grandeur et en direction par le demi-diamètre d'un ellipsoïde à trois axes inégaux, conjugué du plan perpendiculaire au champ.

Cette théorie s'est trouvée d'accord avec les faits pour toutes les substances faiblement magnétiques, mais pour les substances fortement magnétiques, ou ferromagnétiques, cristallisées ou non, elle ne saurait être suffisante. Dans toutes ces substances, en petit nombre d'ailleurs, la relation entre l'intensité d'aimantation et le champ n'est pas linéaire; elle présente le phénomène bien caractéristique de la saturation: lorsque le champ augmente indéfiniment, l'intensité d'aimantation tend vers une limite qu'elle ne saurait dépasser.

Si donc, dans les substances isotropes, le problème expérimental consiste à déterminer la fonction d'une variable qui exprime la dépendance de l'aimantation et du champ, il comprend, dans les cristaux, la connaissance des trois composantes de l'aimantation suivant trois axes rectangulaires en fonction des trois composantes du champ. Le principe de la conservation de l'énergie permet, il est vrai, de simplifier le problème et de le ramener à la détermination d'une seule fonction de trois variables; il n'en reste pas moins très compliqué<sup>1)</sup>.

Plutôt que de discuter ici plus avant les procédés mathématiques de représentation des résultats expérimentaux, nous montrerons, par un exemple concret, combien on trouve dans les phénomènes magnéto-cristallins des ferromagnétiques une plus riche variété que dans ceux des substances faiblement magnétiques. La Magné-

---

<sup>1)</sup> Pour simplifier cet exposé, je fais abstraction des phénomènes d'hystérèse qui compliquent davantage le problème.

tite, ou oxyde de fer magnétique, à laquelle j'ai consacré une étude avant d'aborder celle de la pyrrhotine, se rencontre en beaux cristaux du système *cubique*. Si elle obéissait à une loi d'aimantation linéaire, les trois coefficients d'aimantation seraient donc égaux et l'ellipsoïde d'aimantation deviendrait une sphère. Les propriétés de cette substance seraient celles d'un milieu isotrope. Mais la Magnétite est ferromagnétique, elle possède une aimantation à saturation qui est égale environ au quart de celle du fer et supérieure à celle du Nickel. Lorsque l'on fait agir un champ magnéti-

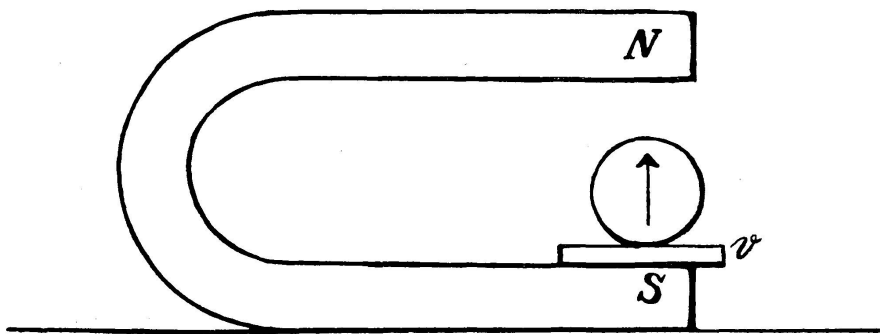


Fig. 1.

sant de grandeur constante, l'extrémité du vecteur représentant l'aimantation parcourt une surface compliquée possédant la symétrie du système cubique et que l'on peut, pour certaines valeurs du champ, décrire comme un cube à faces creuses et à arêtes arrondies. Les axes ternaires, qui coïncident avec les diagonales du cube, sont des maxima d'aimantation, les axes quaternaires, parallèles aux arêtes, sont des minima, et suivant les axes binaires parallèles aux diagonales des faces, l'aimantation prend des valeurs intermédiaires, plus voisines des maxima. Pour un champ de 100 gauss, p. ex. ces intensités d'aimantation sont entre elles comme 19:15:18.

Nous montrerons par une expérience directe cette anisotropie magnétique. Quand on taille un disque

dans un cristal de magnétite et qu'on le place dans le champ d'un aimant, sur un plan poli,  $v$  (fig. 1) en verre, de manière à lui assurer la mobilité nécessaire, on le verra, d'un mouvement d'orientation rapide, mettre un de ses axes d'aimantation maxima en coïncidence avec le champ qui est vertical. Si le disque est parallèle à la face du cube, on trouvera ainsi deux positions d'équilibre rectangulaires dans lesquelles un axe binaire coïncide avec le champ. Si l'on écarte le disque d'une position d'équilibre il y revient vivement, à moins que par un écart angulaire un peu grand on amène l'autre axe d'aimantation maxima à se substituer au premier. Si le disque est taillé parallèlement au plan diagonal du cube, les deux maxima d'aimantation, qui coïncident avec les diagonales, ne sont plus rectangulaires. Il est assez frappant de constater que dans le grand intervalle de leur angle obtus le disque ne trouve aucune position d'équilibre et s'obstine à diriger verticalement l'une ou l'autre diagonale. Enfin nous possédons un disque taillé parallèlement à la face de l'octaèdre. Celui-ci se trouve dans le champ de l'aimant en équilibre indifférent. Toutes les directions sont donc équivalentes dans le plan de l'octaèdre. La surface magnétique à laquelle nous faisons allusion tout à l'heure possède donc quatre sections cycliques, coïncidant avec les quatre faces de l'octaèdre.

Après cette introduction expérimentale abordons le principal objet de cet exposé. La *pyrrhotine* ou pyrite magnétique est un sulfure de fer dont la composition est donnée par  $\text{Fe}^7\text{S}^8$ . Bien que l'analyse chimique laisse planer quelque incertitude sur une formule à aussi grands coefficients, il n'est pas douteux qu'elle constitue une espèce bien définie par ses caractères minéralogiques. Elle se présente en cristaux d'apparence hexagonale qui peuvent atteindre de grandes dimensions. La cassure montre fréquemment une

matière parfaitement compacte et homogène qui a la couleur d'un bronze foncé.

Mes premières expériences sur l'aimantation de ce cristal mirent de suite en évidence des propriétés très extrêmes. La variation de la grandeur de l'aimantation dans un champ donné et son inclinaison sur la direction du champ furent de suite trouvées beaucoup plus grandes que dans la magnétite. Le caractère le plus frappant

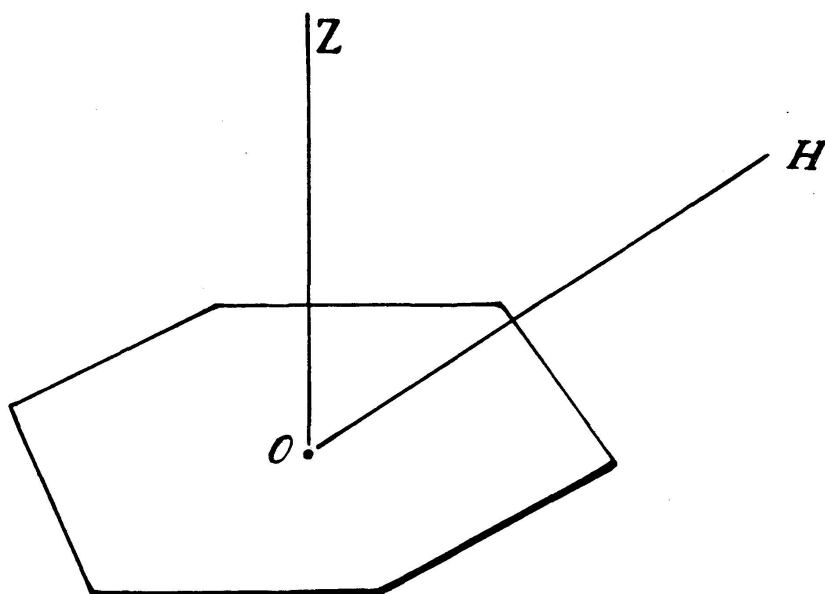


Fig. 2.

était un minimum très accentué de l'aimantation dans la direction perpendiculaire au plan de base hexagonal du prisme et en essayant de mesurer la grandeur de cette aimantation minima je la trouvai nulle. Cette propriété curieuse a été contrôlée ensuite avec une grande exactitude et a été trouvée générale. La substance est donc réfractaire à toute aimantation dans le sens  $OZ$  (fig. 2). Bien plus, si l'on fait agir le champ dans une direction oblique  $OH$ , non seulement l'aimantation reste dans le plan  $P$ , mais sa grandeur et sa direction dans ce plan sont les mêmes que si la com-

posante de  $OH$ , contenue dans le plan  $P$ , existait seule. J'appellerai, dans la suite,  $P$  le plan magnétique de la substance.

La démonstration de ces propriétés a été obtenue au moyen d'expériences d'induction faites avec le gal-

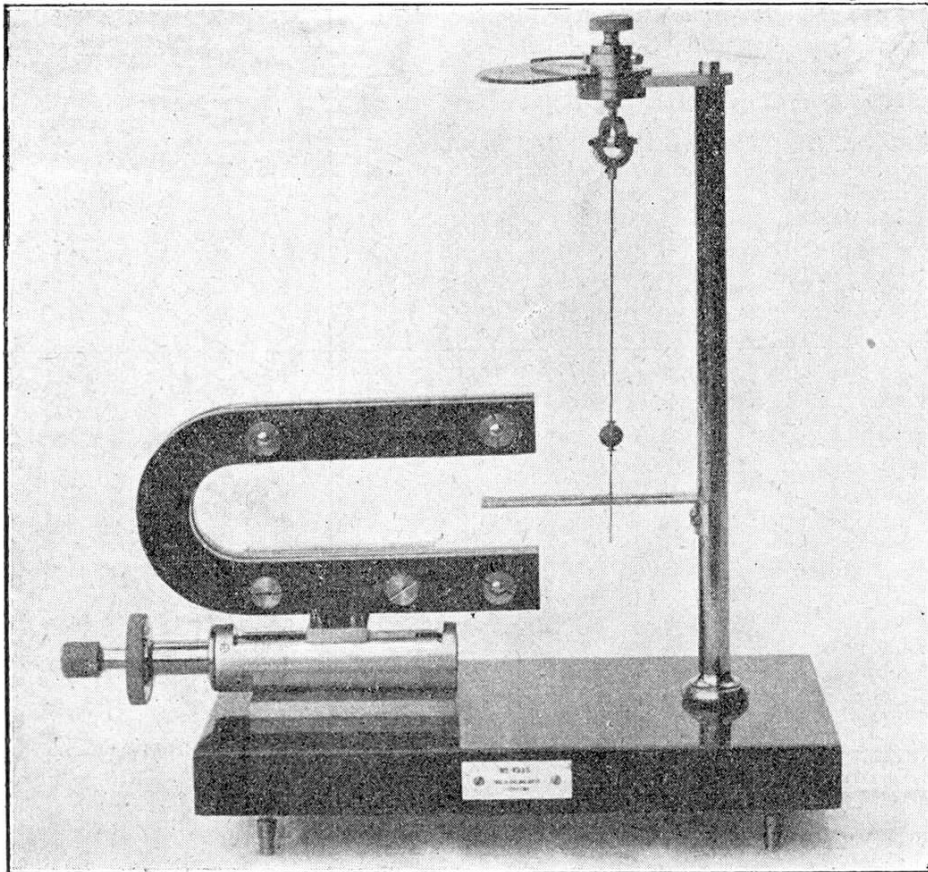


Fig. 3.

vanomètre balistique. J'en donnerai ici une démonstration immédiate et sensible, au moyen de l'appareil ci-dessus (fig. 3). Une petite sphère de pyrrhotine est suspendue au moyen d'un genou universel de manière à présenter à volonté le plan magnétique perpendiculairement ou parallèlement aux lignes de force d'un aimant. Dans le premier cas on peut approcher l'aimant

jusqu'au contact de la sphère sans observer le moindre déplacement, dans le deuxième l'attraction se manifeste par un mouvement de plusieurs centimètres d'amplitude.

Ce premier point établi, l'étude du phénomène était énormément simplifiée. Néanmoins les résultats furent d'abord d'une complexité déroutante. La courbe représentant les variations de la composante de l'aimantation parallèle au champ dans un champ constant lorsque l'orientation de ce champ dans le plan magnétique varie, était loin de mettre en évidence la symétrie hexa-

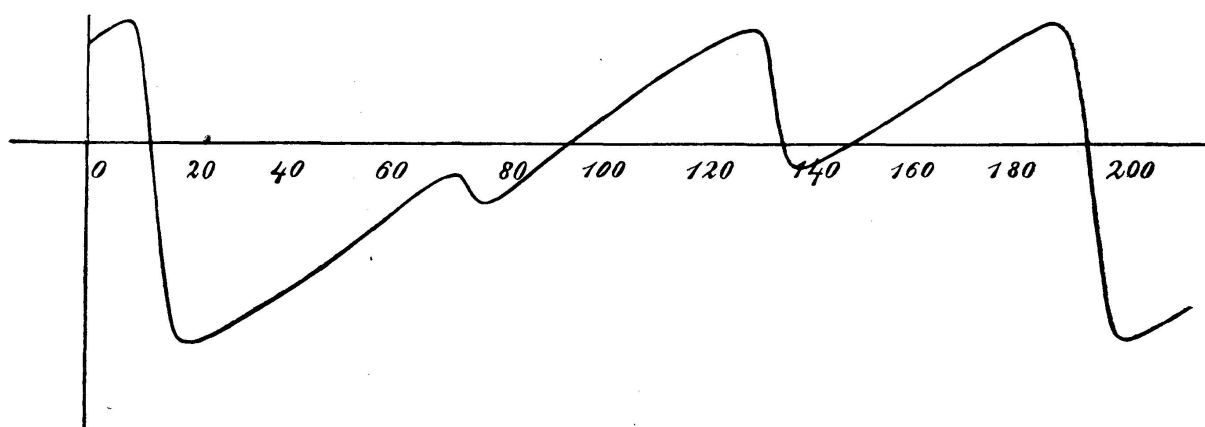


Fig. 4.

gonale prévue. Elle conduisait tout au plus à la symétrie clinorhombique et les résultats étaient très variables d'un échantillon à l'autre.

Cette confusion se dissipa tout à coup par l'examen de la figure 4. Elle représente un résultat d'expérience immédiat. On a porté en abscisses les angles d'orientation du champ constant par rapport à une direction quelconque prise comme origine des angles dans le plan magnétique et en ordonnées la grandeur de la composante de l'aimantation perpendiculaire au champ. La partie représentée ne comprend qu'un intervalle angulaire de  $180^\circ$  environ, les phénomènes se reproduisant toujours à  $180^\circ$  de distance. Pour nous rendre compte

de la signification de cette courbe ayons recours à une comparaison.

Imaginons un morceau de fer doux ayant une forme allongée, par exemple celle d'une aiguille de boussole. Si nous plaçons cette aiguille dans un champ donné, son aimantation sera maxima si le champ agit dans le sens de la longueur, minima s'il agit en travers. Si, maintenant l'aiguille immobile, nous faisons tourner

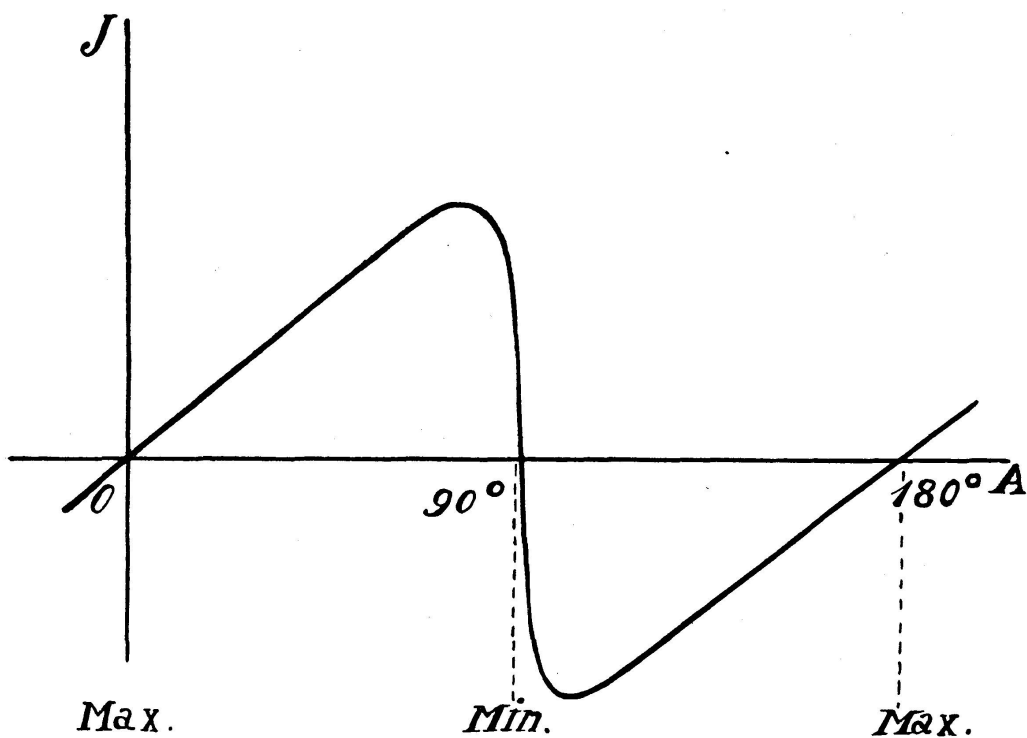


Fig. 5.

l'aimant produisant le champ d'un mouvement continu autour d'elle de manière à faire passer celui-ci de la direction de l'aimantation maxima à celle de l'aimantation minima par toutes les directions intermédiaires, l'aimantation tourne constamment dans le même sens que le champ. Mais ayant une tendance à séjourner plus longtemps au voisinage du maximum elle y ralentira sa rotation pour l'accélérer au contraire au voisinage du minimum. Plus l'aiguille sera longue et étroite,

plus vite l'aimantation dépassera le champ au voisinage du minimum, ou, en d'autres termes, plus rapide sera la variation de la composante de l'aimantation perpendiculaire au champ dans le voisinage du minimum. La courbe représentant cette composante en fonction de la direction du champ sera de la forme représentée en fig. 5. Imaginons qu'un élément cristallographique simple constituant la pyrrhotine ait des propriétés analogues à celles de ce morceau de fer doux. La fig. 4 résulte alors visiblement de l'addition des ordonnées de trois courbes semblables à celles de la fig. 5, construites à des échelles différentes et déplacées l'une par rapport à l'autre de  $60^\circ$ .

Nous supposerons donc que l'édifice complexe du cristal résulte de la juxtaposition de cristaux élémentaires dont les plans magnétiques sont parallèles et qui sont associés suivant trois orientations distantes de  $60^\circ$ , ou, ce qui revient au même, de  $120^\circ$ .

Mais l'importance de la quantité de matière correspondant à chacune de ces orientations est différente, comme si elle était réglée par des circonstances accessoires au moment de la formation du cristal.

Les minéralogistes connaissent de nombreux exemples analogues de groupements cristallins qui rendent cette hypothèse très plausible. D'ailleurs la pyrrhotine elle-même en fournit d'abondantes vérifications. Cherchant à isoler l'élément simple, je déterminai la variation de l'aimantation perpendiculaire au plan dans plusieurs centaines d'échantillons. Pour certains d'entre eux l'amplitude des trois variations brusques à  $60^\circ$  l'une de l'autre était sensiblement la même. Pour d'autres, deux d'entre elles prédominaient, pour d'autres encore une seule était prépondérante. Mais, même en divisant la matière en tout petits fragments je ne pus rencontrer un échantillon absolument simple. Pour un fragment dont la masse ne dépassait pas 1 mg, je trouvai :

1 <sup>re</sup> direction		97 p. cent de la matière
2 <sup>me</sup>	»	3 » » » » »
3 <sup>me</sup>	»	0 » » » » »

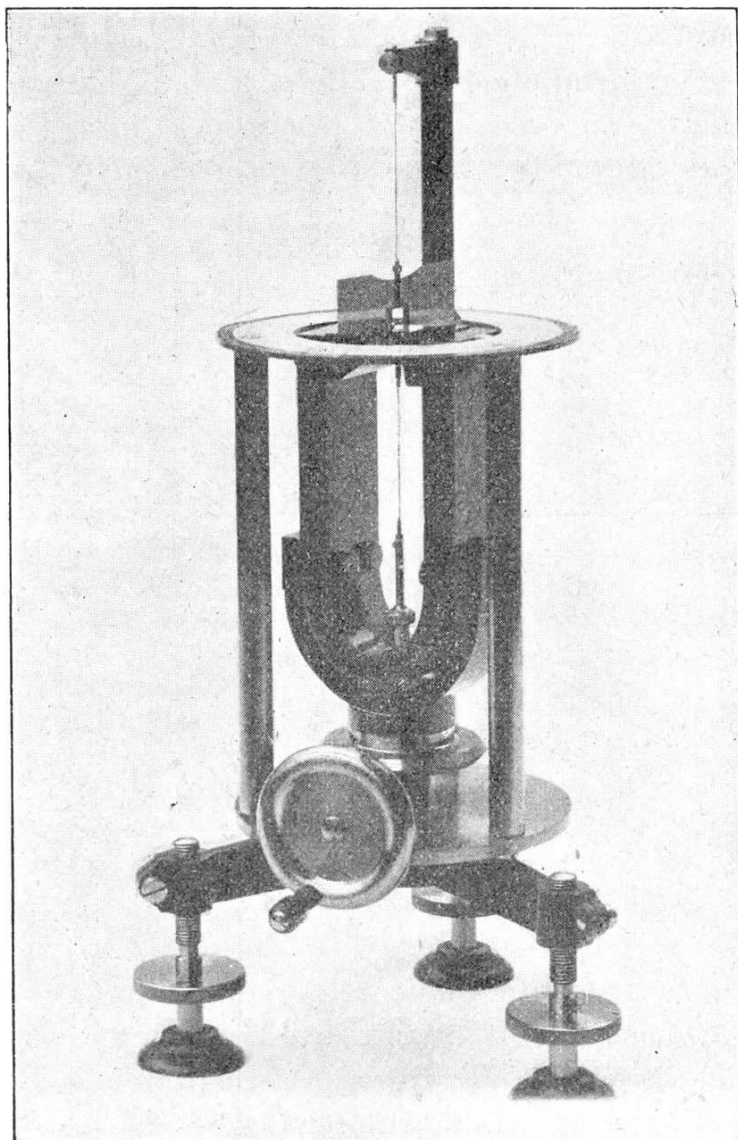


Fig. 6.

En présence d'une telle approximation on doit considérer l'existence indépendante de l'élément simple de la pyrrhotine comme démontrée avec la même certitude que si on l'avait isolé.

La fig. 6 représente un appareil de démonstration, au moyen duquel on peut analyser, par observation directe, la composition élémentaire d'un cristal de pyrrhotine. Un aimant peut tourner d'un mouvement continu autour du cristal dont le plan magnétique horizontal est constamment parallèle aux lignes de force de l'aimant. Le cristal est porté par un fil vertical, assez rigide pour que le couple exercé par l'aimant ne

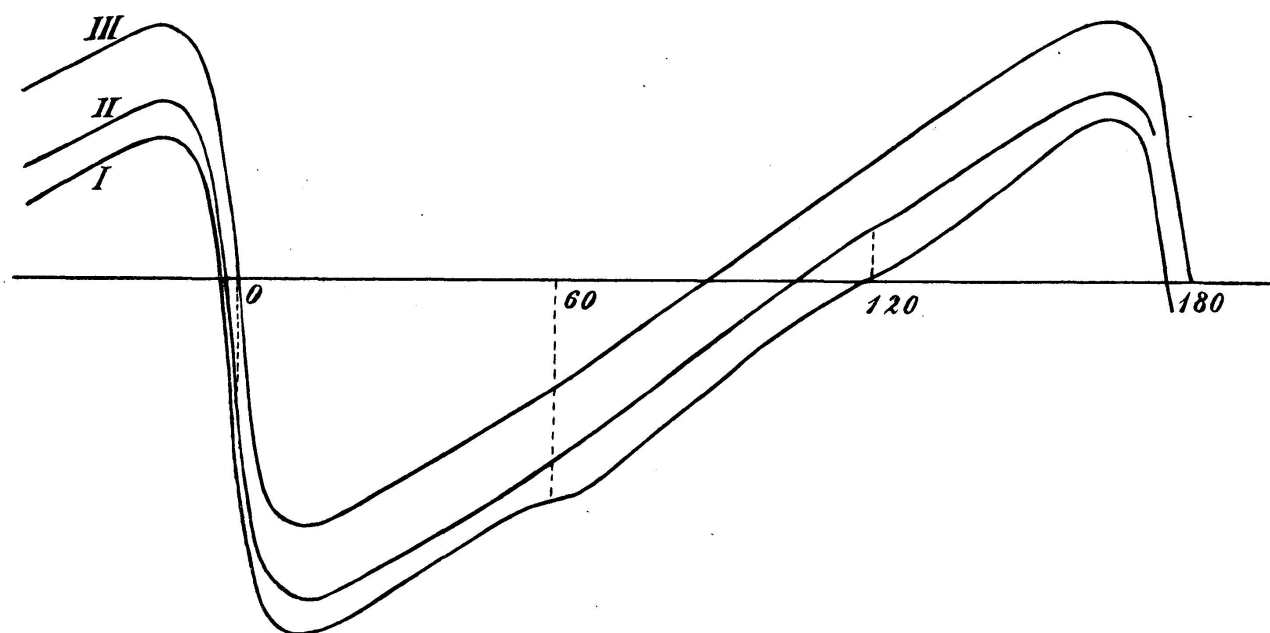


Fig. 7.

lui imprime que de petites torsions qu'une aiguille mobile au-dessus d'un cercle divisé permet de mesurer. Les déplacements de l'aiguille correspondent donc aux ordonnées des courbes employées ci-dessus. Quand l'aiguille marche rapidement en sens inverse du mouvement de l'aimant, elle décèle, par suite, le passage du minimum d'un des cristaux élémentaires. Nous faisons l'expérience avec des cristaux de diverses compositions.

Au point où nous sommes arrivés, le prochain problème qui se pose est la connaissance des proprié-

tés d'un cristal élémentaire. Mais la description des résultats acquis dans cette voie nous entraînerait trop loin. Je me bornerai à montrer par un exemple graphique comment on peut y arriver à travers les difficultés que crée la structure complexe des cristaux. La figure 7 représente l'aimantation perpendiculaire au champ, dans un champ de 3620 gauss, d'une matière, dans laquelle les deux directions parasites interviennent pour 7,5 et 3,5 p. cent. La courbe I est la courbe expérimentale, la courbe II est corrigée de l'influence de la première matière parasite à  $60^{\circ}$  de la composante principale, la courbe III est corrigée en outre de l'influence de la deuxième, moins importante, à  $120^{\circ}$ . On peut de même opérer sur la composante de l'aimantation parallèle au champ et répéter ces opérations pour diverses valeurs du champ. On possède alors les lois expérimentales de l'aimantation de l'élément magnétique simple de la pyrrhotine. L'ensemble de ces résultats est compatible avec la symétrie *orthorhombique*.

Mais le principal intérêt de ces recherches ne me paraît pas être de nature cristallographique. De très nombreux travaux ont déjà été consacrés à l'étude des métaux ferromagnétiques. Les résultats sont condensés entre autres dans de très nombreuses courbes d'aimantation et l'on ne saurait dire que la compréhension des phénomènes complexes qu'elles représentent ait marché parallèlement avec l'accumulation des documents. Cela cesse d'être surprenant si l'on considère que les matières ferromagnétiques usuelles, telles que les fers et les aciers sont des enchevêtrements de cristaux dont l'observation ne donne que des propriétés moyennes. On peut donc estimer à priori que les propriétés importantes de la molécule magnétique ont plus de chances de se dévoiler par l'étude d'un cristal isolé que par l'étude globale des matières.

Nous arrivons donc, en fin de compte, à cette

opinion, que la structure cristalline, loin de compliquer les phénomènes, est le levier le plus puissant, peut-être, que nous puissions mettre en oeuvre dans nos investigations sur la nature des phénomènes magnétiques. Et, en effet, sans entrer dans les détails, je ne crains pas d'affirmer que les résultats expérimentaux, acquis dès maintenant sur le cristal élémentaire de la pyrrhotine, sont pleins de promesses à cet égard. J'espère, dans une prochaine occasion, montrer que le but que je me suis proposé dès l'origine de ces recherches magnétiques, à savoir de remonter des résultats expérimentaux aux théories générales, ne s'est pas dérobé.

---