

Sur des propriétés de la matière ferromagnétique en lames et fils minces

Autor(en): **Perrier, Albert**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Helvetica Physica Acta**

Band (Jahr): **5 (1932)**

Heft I

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-110157>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Sur des propriétés de la matière ferromagnétique en lames et fils minces¹⁾

par Albert Perrier.

(28. I. 32.)

Sommaire. — Si l'on suppose une matière ferromagnétique divisée en fragments dont une, deux ou les trois dimensions atteignent l'étendue des « domaines de couplage » mécanique et magnétique des groupements saturés élémentaires, ses propriétés spécifiques doivent être modifiées quantitativement et affecter simultanément des anisotropies déterminées.

Cela doit se manifester en premier lieu sur les courbes d'aimantation et de magnétostriction; mais les autres propriétés sensibles au champ magnétique (conductibilités électrique et calorifique, thermoélectricité, élasticité, ...) présenteront également des changements corrélatifs de physionomie. En outre, on peut attendre des modifications caractéristiques spontanées pour chacun des groupes de phénomènes cités, sans aucune intervention magnétique. — Comparaison est faite en terminant avec des données récentes de l'expérience.

I. *Le problème.* — La théorie de la magnétostriction et des courbes d'aimantation dont l'auteur a esquissé les lignes générales comporte des conséquences nombreuses et jusque dans des domaines assez éloignés du magnétisme. Un certain nombre ont déjà été indiquées, d'autres le seront successivement²⁾.

Le présent article est consacré à l'un de ces groupes de phénomènes, lequel découle de l'examen du problème suivant:

Quels changements peut-on attendre dans les propriétés spécifiques (magnétiques et autres) de la matière ferromagnétique lorsqu'on l'étudiera en échantillons dont l'une des dimensions au moins est inférieure à une grandeur à assigner?

Plaçons-nous donc sur le terrain de la théorie: selon elle,

¹⁾ Comm. à la Soc. vaudoise des Sc. naturelles, séance du 18 novembre 1931, résumé au Bull. S.V.S.N. 1932

²⁾ A. PERRIER, Lignes générales d'une théorie de la magnétostriction. Soc. suisse de Phys., Séance du 2 mai 1931. H.P.A., vol. 4 (1931), p. 214—237.— A. P., Interprétation mécanique de la susceptibilité réversible et de ses variations thermiques. Bull. Soc. vaud. Sc. nat., vol. 57 (1931), p. 293 (Séance du 1er juillet 1931).

chaque cristal d'un corps ferromagnétique a la « texture »¹⁾ d'une mosaïque de groupements spontanément saturés (vecteur caractéristique: $\mathcal{J}_s$ moment magnétique de l'unité de volume).

J'ai fait voir que la seule hypothèse de l'anisotropie liée à $\mathcal{J}_s$ implique l'existence de couplages mécaniques aussi bien que magnétiques entre les groupements, que dès lors l'interprétation des courbes d'aimantation comme de l'ensemble des phénomènes directs et inverses de striction peut s'y rattacher rationnellement à l'aide de la condition mécanique générale du minimum (statistique) d'énergie potentielle.

II. *Domaines de couplage et division de la matière.* — Considérons l'un quelconque des groupements saturés. Son énergie potentielle magnétique et élastique est manifestement déterminée non pas par les seuls éléments adjacents de matière, mais par l'ensemble de ceux qui sont contenus dans une région environnante plus ou moins étendue: il suffit pour s'en convaincre au point de vue mécanique d'envisager que toute rotation de $\mathcal{J}_s$ dans un élément quelconque, par le fait qu'elle entraîne des déformations dans les éléments au contact, le fait nécessairement pour tous leurs voisins, et ainsi de suite; pour le couplage magnétique, la même chose est immédiatement évidente. Mais ces effets liés vont d'autre part s'atténuant avec la distance, en sorte que nous pourrions raisonnablement parler de la dimension moyenne d'un *domaine de couplage* autour de chaque point du milieu ferromagnétique, dimension qui dépendra de l'aimantation spontanée, des modules d'élasticité, des caractères réticulaires et de la dimension moyenne des groupements (donc en particulier de la température par la plupart de ces grandeurs simultanément).

¹⁾ Dès la présente publication, je ferai usage de la terminologie française suivante: propriétés « *réticulaires* » pour les termes anglais et allemands « *structure unsensitive properties* » et « *strukturunabhängige Eigenschaften* » (propriétés complètement déterminées par le réseau cristallin proprement dit, soit le réseau « *primaire* » de F. ZWICKY), puis propriétés « *texturales* » pour « *structure sensitive p.* » « *strukturabhängige E* » (celles qui sont liées en outre à des arrangements de fragment cristallins comprenant chacun des nombres considérables molécules et pouvant être schématisés par un réseau « *secondaire* » (F. Z.) ou comme je dirai parfois un « *surréseau* »).

L'usage en français du seul vocable *structure* laisserait trop de place à l'équivoque; et puis le sens usuel du mot *texture* s'adapte tout à fait bien à l'acception recherchée ici; enfin, le même terme a été employé avec avantage dans un sens comparable par G. et E. FRIEDEL (« *Sur la texture à coniques focales dans les corps mésomorphes* », Journ. de Phys. et Rad. (VII), t. 2 (1931), p. 133) pour la classification des liquides anisotropes.

Procédons maintenant à la division progressive d'un bloc de matière ferromagnétique (mono ou pluricristallin; sans autre précision le langage usité s'appliquera au second cas). Pour fixer les idées et simplifier, servons-nous pour cela de systèmes de coupures planes, parallèles et équidistantes dans chaque série; en sorte que nous réalisons successivement des lames à faces parallèles, des bâtonnets prismatiques («fils») et enfin des grains à faces quadrangulaires. Serrons graduellement les coupures; aussi longtemps que les équidistances demeurent sensiblement supérieures à la dimension moyenne des domaines de couplage, les propriétés *spécifiques* moyennes de la matière demeurent identiques; mais il n'en sera certainement plus ainsi lorsque ces dimensions après avoir été atteintes, seront dépassées par défaut.

Car alors il est clair que, les domaines de couplage devenant incomplets et de plus en plus, les énergies potentielles mutuelles *commencent à diminuer* (en valeur absolue!) et tout d'abord de plus en plus. Mais en continuant la division, les mêmes énergies doivent *se fixer encore à un nouveau palier* que l'on peut en gros arrêter ainsi: lorsque les aires de contact des groupements adjacents deviennent négligeables devant leurs surfaces de coupure par les plans. A partir de ce stade de division, seuls les caractères du réseau primaire entrent encore en ligne de compte pour les propriétés spécifiques¹⁾.

Nous laisserons cette ultime étape de division (v. aussi § IX) en dehors de nos considérations pour les concentrer sur le premier groupe de modifications. Le sens général des phénomènes à prévoir va être conditionné en premier lieu par cette conclusion que nous devons admettre un *accroissement moyen de la liberté d'orientation des vecteurs $\mathfrak{I}_s$* .

Mais nous pouvons formuler des propositions beaucoup plus précises. Remarquons tout d'abord que *les propriétés des trois types de matière divisée* (lames, fils, grains), *différentes déjà de celle de la matière compacte, ne seront en outre pas identiques entre elles*; car les couplages qui subsistent dans chacun d'eux sont respectivement, pour s'exprimer en abrégé, *à deux dimensions, à une dimension, à zéro dimension*. Il s'en suit que dans les lames et les fils, sur lesquels n'agit aucun champ et d'ailleurs complète-

¹⁾ Il va de soi que les conditions proprement réticulaires jouent leur rôle en tout état de cause, mais je n'ai pas jugé à propos d'en tenir expressément compte dans ce travail abrégé qui a particulièrement en vue des milieux microcristallins à orientation diffuse; on verrait d'ailleurs facilement qu'elles ne changeraient rien à la nature des conclusions formulées ici.

ment désaimantés, les directions des vecteurs aimantation ne peuvent cependant pas être réparties uniformément dans l'espace; leurs répartitions d'équilibre seront spontanément privilégiées autour des normales aux lames ou des parallèles aux bâtonnets comme directions de symétrie. La plus grande densité des directions pourra d'ailleurs être axiale ou polaire selon les signes des anisotropies mécaniques élémentaires par rapport à $\mathfrak{J}_s$.

En résumé, des lames et fils ferromagnétiques, mais même sans aucune aimantation observable, doivent être anisotropes dès que leur épaisseur est inférieure aux dimensions de leur domaine propre de couplage.

Observons d'ailleurs en passant que cette conclusion serait valable également pour une région suffisamment mince à la surface d'un corps ferromagnétique compact.

Nous allons appliquer les propositions générales ci-dessus à des questions importantes et diverses; je le ferai succinctement, ne voulant donner ici qu'un aperçu général des possibilités.

III. *Courbes d'aimantation.* — Les conséquences les plus immédiates, bien entendu, touchent les courbes d'aimantation dont on doit s'attendre en principe à distinguer pour la même matière six variétés plus ou moins dissemblables: milieu compact, lames et bâtonnets sous l'action de champs normaux et parallèles, grains. Les facteurs spécifiques des échantillons de départ (dureté, etc.) entreront fortement en ligne de compte pour déterminer l'étendue des différences. La règle générale de sens énoncée plus haut autorise toutefois à prévoir qu'en général l'irréversibilité¹⁾ des courbes cycliques doit être réduite par le degré de division de la matière mais pas au même degré dans les directions parallèles et normales aux lames et fils. Quant à la contribution purement réversible exprimée par la susceptibilité initiale, on doit s'attendre à des modifications dans les deux sens.

L'aimantation à saturation observable (champs inducteurs très intenses) seule doit persister comme une constante isotrope et indépendante du degré comme du type de division.

Combinons encore avec l'origine à laquelle j'ai attribué les irréversibilités thermiques dans le travail précité sur la magnétostriction. On est en droit de prévoir que la réduction des dimen-

¹⁾ Dans la théorie invoquée ici (A. P. loc. cit.), cette prévision est valable quelle que soit l'origine des phénomènes d'hystérèse. Je montrerai d'ailleurs très prochainement comment on peut établir une bonne interprétation particulière des champs coercitifs dans cette même théorie sans hypothèse nouvelle.

sions à l'ordre de grandeur précisé doit agir encore *dans le même sens d'une réduction de tous ces effets*, réduction qui pourrait atteindre à l'annulation pour des grains idéaux, c'est à dire ceux qui ne formeraient qu'un seul groupement saturé. Et cela nous ramène logiquement à l'origine purement *texturale* des irréversibilités, laquelle constitue une idée fondamentale de la théorie de la mosaïque cristalline. Toutefois, dans sa forme extrême, la conclusion ci-dessus se heurtera peut-être à cette possibilité que les éléments de la mosaïque ferromagnétique, les groupements saturés, ne soient pas déterminés dans le cristal d'une manière fixe et définitive. Il serait tout à fait superflu d'entreprendre ici une discussion, manifestement prématurée, de ces possibilités là.

Ces considérations générales sur les irréversibilités consécutives à des traitements thermiques *s'appliquent mutatis mutandis, à toute la série des phénomènes différents qui suivent*, je le note ici une fois pour toutes.

IV. *Conduction électrique.* — On sait que le champ magnétique agissant sur un milieu ferromagnétique, lui communique des conductibilités électriques différentes selon les directions relatives du courant et du champs et différentes aussi par conséquent de celle du milieu neutre. *La grandeur de toutes ces variations de résistance doit être, en vertu de ce qui précède, fonction du type et du degré de division et de plus dépendre de l'angle formé par le champ magnétique avec le plan des lames ou l'axe des fils. Ces modifications par les dimensions et la forme doivent ici subsister jusqu'à la saturation inclusivement.*

Une seule grandeur doit demeurer toutefois caractéristique pour une substance définie: *la différence entre les résistivités mesurées parallèlement et normalement au champ à la saturation observable.*

Les propositions générales du § II autorisent encore des prévisions beaucoup plus inattendues:

La *résistivité ordinaire* (en l'absence de toute aimantation observable!) *doit affecter spontanément des valeurs différentes selon qu'on la détermine parallèlement ou normalement aux lames et fils*, et en outre ces paires de valeurs se placeront de part et d'autre de celle du milieu compact. Il est à peine besoin d'ajouter que des considérations du même ordre pourraient être aisément formulées pour l'effet Hall, en tenant compte attentivement dans chaque cas du type différent de symétrie de ces phénomènes.

V. *Conduction calorifique et thermoélectricité.* — A l'aide des modes de raisonner introduits ailleurs¹⁾ et de ceux du présent travail, on trouverait une série de propositions corrélatives des précédentes pour ces deux ensembles de phénomènes. J'y reviendrai lorsque les autres questions d'un intérêt plus immédiat auront été soumises à expérience.

VI. *Magnétostriction et effets connexes.* — Les lois à formuler ici se tireront presque entièrement de celles qui touchent la conduction électrique par de simples transpositions de langage.

Ici encore, nous aurons à envisager des *magnétostrictions différentes de celles de la matière compacte et de plus anisotropes.*

Ici encore, la *différence des dimensions linéaires mesurées parallèlement et perpendiculairement* à des champs magnétiques très intenses doit être sensiblement une *constante spécifique du milieu.*

Enfin, on est fondé à prévoir que le seul fait de réduire un milieu ferromagnétique en lames ou fils d'épaisseur convenable doit provoquer *une striction spontanée macroscopique* (toujours donc sans l'intervention d'aucune action magnétique). — C'est-à-dire par exemple que les constantes réticulaires moyennes comptées parallèlement à une lame seront plus petites que perpendiculairement; la valeur moyenne de la matière compacte étant comprise entre les deux de telle sorte que la densité reste sensiblement la même.

VII. *Elasticité.* — Diverses recherches empiriques de ces dernières années ont fait connaître que le module d'élasticité (d'Young) dépend sensiblement de l'action simultanée du champ magnétique, plus correctement dit, de l'aimantation observable. Je montrerai dans une publication prochaine comment ma théorie de la magnétostriction comporte un ensemble de propositions sur la « magnétoélasticité » dans lesquelles se trouvent en particulier les quelques faits déjà observés.

Anticipant sur cette publication, je veux signaler ici sans démonstration celles de ces déductions qui présentent des points de contact avec le sujet général ici discuté.

¹⁾ A. PERRIER, Interprétation unitaire des particularités de la conduction des milieux ferromagnétiques, H.P.A., vol. 3 (1930), p. 400—427. — A. P., Communauté d'origine et dépendances quantitatives entre les actions du champ magnétique sur les courants d'électricité et de chaleur, H.P.A. vol. 2 (1929), p. 308—319. — A. P., Grandeurs et formules théoriques nouvelles pour les phénomènes galvanomagnétiques et thermomagnétiques, H.P.A., vol. 3 (1930), p. 317 à 328.

Dans un milieu ferromagnétique à orientation diffuse, l'action d'un champ magnétique croissant fait varier graduellement le module d'Young observé parallèlement à lui (les mesures doivent toutefois ne mettre en jeu que des déformations très faibles!) jusqu'à la saturation, état dans lequel il doit se montrer finalement plus élevé qu'en l'absence de champ.

Dans les lames et fils de dimensions définies plus haut, ces effets seront, toujours pour les mêmes causes générales, différents et anisotropes. L'égalité des modules d'Young doit toutefois se retrouver à la saturation magnétique observable dans les grains, bâtonnets, lames et blocs compacts.

Je laisse complètement à des publications ultérieures tous les cas plus complexes du non-parallélisme des tensions et des champs.

Je ne veux pas toutefois passer sous silence une autre prévision générale de la théorie et dont aucune expérience de moi connue n'a fait soupçonner jusqu'ici l'existence.

En l'absence de toute aimantation observable, et d'ailleurs aussi de tout champ magnétique, les déformations élastiques doivent comprendre une part due au ferromagnétisme. Ceci se manifesterait par exemple en ce que le module d'extension apparaîtra plus petit devant des contraintes faibles que vis-à-vis d'efforts plus élevés, puis tendra vers une limite fixe pour des contraintes suffisamment intenses (complications réservées qui pourraient provenir de déformations rémanentes). En d'autres termes, la loi de Hooke ne doit pas être rigoureusement valable pour les déformations initiales déjà. Bien que d'origine profonde magnétique, cet effet ne doit du reste s'accompagner d'aucune aimantation observable.

Ces propositions s'appliquent à n'importe quel bloc. La matière divisée manifestera les effets prévus avec les différences d'aspects et d'intensité corrélatives de celles qui ont été exposées plus haut pour d'autres cas.

J'exposerai aussi prochainement et en liaison étroite avec ce qui précède, comment des interventions purement mécaniques, même faibles, sur des corps ferromagnétiques, doivent y provoquer des variations anisotropes des conductibilités électrique et calorifique et du pouvoir thermoélectrique. Ces variations dépendront, elles aussi, de la division des milieux.

VIII. *Rapprochement avec un fait d'expérience nouveau.* — Préalablement à toute comparaison avec la réalité, il importe tout d'abord de noter que les connaissances acquises sur les fils

et tôles minces préparés à la manière habituelle par tréfilage, laminage, ou même par voie électrolytique, *n'autorisent aucune conclusion sur les propositions développées dans le présent travail.*

En première ligne parce que l'écrouissage ou le dépôt électrolytique créent des anisotropies de texture assez considérables pour noyer tous les phénomènes recherchés, en deuxième ligne parce que, si même des recuits convenablement prolongés pouvaient effacer les traces de ces traitements antérieurs, il serait bien difficile de disposer de la substance-témoin, de texture identique mais de grande étendue dans toutes directions.

D'autre part l'intensité des actions démagnétisantes enlèverait une grande part de valeur comparative aux données numériques obtenues *normalement* aux lames et fils, et plus encore sur de la matière granulée.

C'est sans doute là ce qui explique que les phénomènes prévus théoriquement — s'ils existent réellement! — qui seraient d'une grande fécondité dans la connaissance de la texture des métaux, n'aient jamais été remarqués jusqu'ici.

Mais des expériences toutes récentes de M. LÉON MEYLAN¹⁾ ont révélé nettement le fait tout nouveau que voici:

Des disques de quelques mm. de diamètre, taillés dans du ferrocobalt à aimants (à 36%), étaient progressivement amincis *par usure*, puis, à chaque épaisseur choisie, aimantés dans leur plan au maximum, stabilisés par trépidations et étudiés au magnétomètre.

Parallèlement à l'affaiblissement graduel du champ démagnétisant diamétral, on devait s'attendre à ce que l'aimantation rémanente s'élevât au fur et à mesure de l'amincissement pour tendre vers la limite déterminée de la rémanence proprement dite (à épaisseur nulle). C'était là du reste le but que visait M. MEYLAN, et ses courbes montrèrent tout d'abord le caractère prévu jusque vers une épaisseur de 0,07 mm.; mais à partir de là, le gain d'aimantation espéré commença très visiblement à fléchir; puis il se transforma finalement en une *perte certaine* vers 0,02 mm. d'épaisseur, limite atteinte dans ces essais; cela est exactement en accord avec une prévision fondamentale formulée au § III.

Or, dans mon travail sur la magnétostriktion (loc. cit p. 219), j'avais évalué, à l'aide des rares données qui pouvaient entrer

¹⁾ LÉON MEYLAN, dans «Réalisation d'un galvanomètre à aimants mobiles astatisé par un procédé nouveau.» Comm. Soc. vaudoise des Sc. naturelles, Séance du 18 novembre 1931. Paraîtra très prochainement aux Helv. Phys. Acta.

en ligne de compte, que les groupements saturés du nickel pourraient affecter des dimensions linéaires — toutes réserves de configuration faites — de l'ordre du $\frac{1}{100}$ de mm. S'il en était ainsi, le domaine de couplage devrait s'étendre sur ces dimensions *au moins*. L'on vient de voir que l'anomalie rencontrée par M. MEYLAN se fait sentir précisément au dessous d'épaisseurs de l'ordre de quelques centièmes de mm.; si l'on note que ses recherches, exécutées à Bruxelles, étaient dirigées dans un sens tout à fait étranger aux miennes, inconnues de lui d'ailleurs, cette coïncidence remarquable peut malaisément être attribuée au hasard et encourage vivement des expériences spécialement instituées en vue du contrôle expérimental de ces aspects de la théorie.

IX. *Remarque concernant les couches extrêmement minces.* — Il y a longtemps déjà que l'on a entrepris des recherches et obtenu des résultats positifs sur les propriétés anormales de couches métalliques extrêmement minces et en particulier de ferromagnétiques. Il s'agissait le plus souvent de dépôts obtenus sur du verre par voie électrolytique ou cathodique. Il n'est peut-être pas inutile de noter que les propriétés présumées dans le présent article sont totalement étrangères à cette «capillarité métallique». Ces deux sortes d'études comportent des *étendues de matière d'ordres différents*: d'un côté des épaisseurs mesurées par un nombre de molécules relativement petit et pouvant descendre jusqu'à la couche monomoléculaire, de l'autre, celles auxquelles est consacré ce travail, et qui comprennent non plus seulement des nombres de molécules, mais des nombres de groupements réticulaires, ce qui peut conduire à des épaisseurs se chiffrant par dizaines de milliers de diamètres moléculaires.

Lausanne, Laboratoire de physique de l'Université.
