ANNALES SCIENTIFIQUES

DE

L'UNIVERSITÉ DE JASSY

TOME I

I-er FASCICULE

SEPTEMBRE 1900.

Universitatea din Iaşi
Seminarul Matematic
1926: 308

4019154
Periodice

JASSY
IMPRIMERIE NATIONALE (IOAN S. IONESCU)
Rue Alecsandri 11.

Force electrometrice d'aimantation [1])

par

Dr. HURMUZESCU

Professeur à l'Université de Jassy.

La tentative faite pour expliquer le magnétisme par les courants particulaires d'Ampère est restée infructueuse. Combinée avec l'hypothèse de la polarisation de Poisson, et aidée par les considérations trés suggestives de Faraday et les vues de Maxwell, cette théorie nous donne un semblant d explication, tout en restant très vague.

Les études de Lord Kelvin, l'introduction des définitions qui caractérisent les états magnétiques, comme la susceptibilité et la perméabilité magnetiques, ont facilité la production d'expériences très intéressantes, parmi lesquelles nous pouvons citer celles de Ewing et de Weber, pour leur conclusion théorique.

Une meilleure connaissance de la perméabilité a permis d'obtenir de très forts champs magnétiques. Alors seulement on a pu étudier les différentes modifications qu'éprouvent les corps par l'aimanation.

Joule le premier a trouvé qu'un fil de fer s'allonge par l'aimanation s'il n'est soumis à aucune traction ; au contraire il se raccourcit s'il est soumis à une forte traction. Les expérimentateurs ont montré depuis, que ces trasformations, dépendent de l'état physique et des variations physiques et mécaniques subies antérieurement [2]).

A priori pouvions nous prévoir ces modifications magnétiques et leur sens ? Pour cela il aurait fallu savoir comment l'énergie magnétique, absorbée par l'aimantation, se transforme dans l'intérieur du corps

Si en laissant de côté toute hypothèse on s'en tient seulement aux faits d'expérience, on constate que l'énergie d'aimanation apportée dans le système a dû modifier d'une manière quelconque l'état de ce système. Pouvons nous mesurer ce changement ? oui, en partie.

---

1) Rapport présenté au Congrès International de Physique à Paris. 6 Août 1900.

2) Voir le rapport de M. Nagaoca présenté au même congrès.

D'après toutes les expériences, il résulte, que l'état magnétique tient d'une manière inconnue pour nous, mais certaine, à la structure du corps. Il semble donc que les modifications mécaniques, physiques qu'éprouvent les corps magnétiques par l'aimantation, soient dues à une modification subie par la molécule elle-même. D'aprés la théorie acceptée aujourd'hui ce ne serait que l'orientation de cette molécule qui donnerait naissance à des tensions dans les cops aimantés.

L'existence de ces tensions nous ost renduo familière par la théorie de Maxwell apqliquée aux diélectriques. Mais on sait que pour ces derniers corps les expériences ont donné lieu à des controverses ; car, tandis que des expérimentateurs ont trouvé qu'il y avait une tension suivant les lignes de force et une contraction dans une direction normale d'autres constataient justement le contraire. On trouverait peut être une partie de ce désaccord dans l'omission de ces forces à la surface de séparation des diélectrique, mises en évidence par M. Pellat.

Les différentes modifications qu'on a constatées comme éprouvées par les corps par l'aimantation sont de deux sortes : mécaniques et physiques. Provenant de l'énergie magnétique, elles doivent être proportionnelles au carré de l'aimanation. En supposant que ces modifications tiennent seulement à l'orientation moléculaire, un corps magnétique homogène et isotrope ne doit subir aucune variation de volume par l'aimantation ; mais si l'expérience prouve le contraire, il faut faire intervenir autre chose qu'une simple orientation. Ainsi on peut admettre p. ex. entre les molécules polarisées une nouvelle force qui fait changer le volume du corps.

Supposons que par suite de la polarisation entre les molécules consecutives il y ait une attraction, on voit tout de suite qu'il s'en suivra une contraction de volume du corps.

Cette contraction de volume on peut l'obtenir par une équation, sans aller si loin dans les hypothèses.

Considérons la variation de l'énergie interne d'un système magnétique absolument homogène et isotrope, comme c'est le cas des liquides magnétiqnes.

Lorsqu'on soumet un tel système à l'action d'un champ magnétique qui varie de H à H+dH son intensité d'aimantation varie de dI et l'énergie magnétique varie de MdI; M étant une fonction de H caractérisant l'état magnétique du corps, et p la pression constante du liquide. Pour une variatioa de volume dv le travail mécanique est pdv. En prenant comme positif le travail magnétique on a :

$$dW = MdI - pdv.$$

dW étant la variation totale de l'énergie interne, doit être une différentielle exacte.

$$\frac{dM}{dv} = -\frac{dp}{dI}$$

Ici pour connaitre la relation entre I et p, on peut supposer que I varie dans le même sens que la densité, laquelle est proportionnelle à p.

Faisons l'hypothèse

$$I = a + b\,p$$

alors $\frac{dp}{dI}$ est positif, $\frac{dM}{dv}$ est négatif, c'est à dire lorsque M augmente, v. diminue. Les expériences que j'ai faites. m'ont prouvé que les dissolutions des sels de fer se contractent dans le champ magnétique. Cette contraction prouve que la simple hypothèse de l'orientation est insuffisante pour expliquer le magnétisme.

Pour les corps solides les vérifications sont beaucoup trop difficiles à cause du manque d'homogénité, c'est pour cela qu'on a étudié plutôt les déformations linéaires.

Toutes les modifications magnétiques varient beaucoup avec l'état physique. Ainsi il y a l'influence du recuit dans les expériences de M. Bidwel ; la structure fibreuse dans les expériences de M. Rhoads [1]). D'après cet auteur le fer à structure fibreuse donne des variations de longueur beaucoup plus fortes suivant les fibres. Il y a aussi la composition de l'échantillon qui entre avec un grand coefficient dans ces phénomènes : nous trouvons un exemple frappant dans les propriétés des alliages de fer et de nickel. La séparation faite par M. Guillaume [2]) en reversibles et irréversibles, les études très intéressantes de M. Dumont [3]), M. Osmond [4]) et en dernier lieu de M. L. Dumas [5]) nous montrent que de très petites quantités de carbone, de manganèse et de chrome abaissent considérablement le point de transformation de ces alliages.

Les modifications physiques dues au magnétisme sont les suivantes :

Les variations de résistance. une augumentation pour le fer et le nickel, une augmentation aussi pour le bismuth.

1) The Physical Review t. VII, p. 65.
2) Ch. Ed. Guillaume. Archives des Sciences physiques et naturelles, t, 5, p. 305 et 427, 1898.
3) Ibidem p. 427, 1898.
4) F. Osmond. Sur les alliages de fer et de nickel. Eclairage Electrique, t. XX, p. 149.
5) Dumas. Sur la position des points de transformation magnétique des aciers au nickel. Eclairage Electrique t. XX p. 15 et t. XXIII p. 314.

Pour les solutions magnétiques les expériences sont négatives. M. Lussana [1]) n'a observé aucune influence du magnétisme sur la résistance électrique des solutions des sels de fer, mais il a constaté une petite influence du magnétisme sur le transport des ions. Ce dernier résultat n'a plus été vérifié par d'autres expérimentateurs depuis.

Mes expériences ne m'ont donné aucune variation appréciable de la résistance des solutions des sels de fer, par le champ magnétique et pour la sensibilité de la méthode employée [2]); et aucune influence sur le transport des ions.

M. G. Milani [3]) a trouvé qu'il n'y a aucune influence du magnétisme sur la conductibilité des dissolutions des sels de fer.

La variation de la résistivité des corps magnétiques solides se conçoit par l'apparition d'une tension mécanique; pour les liquides cette considération ne peut plus avoir place.

Les forces électromotrices thérmoélectriques ont été étudiées par M. Houllevigue [4]), M. Chassagny [5]), M. M. Lala et Fournier [6]).

De toutes ces expériences il résulte que le fer aimanté devient très faiblement positif. Les forces électromotrices thermoélectriques étant très petites en général, pour le cas présent elles sont encore plus petites.

Il faudrait chercher ces modifications de préférence sur les piles hydroélectriques. Pour être dans l'ordre chronologique il faut dire que l'influence du magnétisme sur les piles, avait été cherché depuis un siècle (Fresnel). Mais les essais sont restés infructeux, ou du moins n'ont donné aucun résultat probant jusqu'à l'expérience de M. Remsen en 1881.

Le savant chimiste américain découvrit qu'en plaçant, à cheval sur les deux pôles d'un fort aimant, une cuve en tôle de fer mince dans laquelle on verse du sulfate de cuivre, le cuivre remplace le fer en se déposant, non pas d'une manière uniforme partout, mais suivant des lignes d'égale intensité d'aimantation. Par conséquent le fer se laisse attaquer par l'acide d'une manière différente, suivant le degré d'aimantation. Les parties les plus fortement aimantées se trouvent être les moins attaquées.

1) Lussana. Influence du magnétisme et de la chaleur sur le transport des ions. Il Nuovo Cimento (3), 1, XXXIV, p. 149.
2) Voir Eclairage Electrique. t. XIII. p. 361. Noembre 1897. Voir Archives des Sciences Physiques et Naturelles. t. IV, p. 545.
3) Giulio Milani. Influence d'un champ magnétique sur sa conductibilité des solutions de chlorure de fer. Il Nuvo Cimento. 1, VI, p. 191. 1897.
4. Houllevigne. C. R. t. CXVII. p. 16.
5) Chassagny. C. R. t. CXVI p. 977.
6) Lala et Fournier. C. R. t CXXIII.

Cette expérience eut le don d'indiquer aux expérimentateurs la voie dans laquelle il fallait chercher un effet du à l'aimantion; c. a. d. par les réactions chimiques; or, on a une mesure des réactions chimiques en cherchant les forces électromotrices. On fut donc conduit à chercher si dans une pile électrique, dont le fer forme une des électrodes, la force electromotrice varie par l'aimantation du fer, et quel est le sens de cette variation. Sur le sens de cette variation les avis ont été partagés, car tandis que M. M. Gross, Nichols, Franklin et Andrews trouvaient que le fer le plus aimanté était négatif, par rapport a celui moins aimanté c. a. d. que le fer aimanté est plus attaqué que le fer non aimanté, d'autres expérimenteurs comme M. M. Rowland et Bel, Squier soutenaient le contraire.

D'un autre côté les recherches théoriques de M. Janet et de M. M. Duhem arrivaient aux conclusions irréfutables que le fer aimanté doit être moins attaqué que le fer neutre.

Il fallait chercher à éliminer les causes qui faussaient ainsi les résultats, voir si les méthodes expérimentales n'introduisaient pas des phénomenes parasites. Parmi les phénomènes parasites, il y a la polarisation des électrodes, par la suite de l'emploi d'un courant pouvant donner des indications au galvanomètre, et par l'emploi des électrodes à grande surface.

Pour éliminer ces causes d'erreur j'ai employé des électrodes à la Wollaston qui ne prenaient contact avec la liquide que par une petite surface, d'orientation déterminée par rapport au champ magnétique. En outre je me suis servi de l'électromètre capillaire pour mesurer ces forces électromotrices. Cette méthode experimentale m'a permis l'emploi de liquides très dilués par conséquent d'une grande résistance électrolitique, ce qui avait l'avantage de rendre la réaction chimique beaucoup plus lente, donc aussi plus régulière [1]).

Comment considérer ce problème? Un morceau de fer qu'on aimante, gagne une nouvelle quantité d'energie, et s'il n'en résultait que la modification mécanique, on aurait encore une force électromotrice entre celui-ci, et un échantillon qu'on n'a pas aimanté. On sait en verité, qu'il y a toujours une différence de potentiel entre deux métaux qui ont subi des modifications différentes de traction, de recuit etc.

Pour trouver la relation entre la force électromotrice et l'état magnétique du système, ayons recours à l'application du principe de la conservation de l'énergie interne.

Soit un système composé de deux électrodes a et b en fer doux plongées dans un liquide capable de les attaquer. Si

1) Dr. Hurmuzescu. Force Electromotrice d'aimantation Journal de Physique (3) t. V. p. 119 et Archives des Sciences Physiques et Naturelle, t. V. p. 27. 1898.

l'on aimante a, une force électromotrice prend naissance entre a et b, et supposons que a devienne positive, le courant va de b vers a dans le liquide.

Dans un pareil système nous avons à considerer les variations de différentes enérgies : magnétique, mécanique, électrique etc.

La variation de l'energie magnétique est

$$\frac{I^2}{2k}dv - \frac{I'^2}{2k'}dv' + \frac{I_1^2}{2k_1}dv_1 - \frac{I_1'^2}{2k_1}dv_1'$$

I, I', I_1, I_1' étant les intensités d'aimantation respectivement sur l'électrode a, dans le liquide près de a, dans le liquide près de b et sur l'électrode b. On prend ces quantités des deux côtés de la surface de séparation entre le liquide et le fer, dans un volume très petit dv, dv' dans lesquel l'intensité d'aimantation comme aussi la susceptibilité respective k, sont supposées constantes.

La variation d'énergie mécanique est $\int_{v_1}^{v} T\,dv$, T étant une tension existante dans le corps magnétique isotrope.

Pour une quantité ldq de fer dissoute en b il y a une autre ldq déposée en a, le travail électrique est :

$$(V - V' + V_1' - V_1)\ dq$$

V, V', V_1', V_1 étant les potentiels électriques dans les points considérés, dq étant la quantité d'électricité qui a passé entre les deux électrodes.

En même temps un phénomène calorifique peut prendre naissance, il est possible de le faire rentrer dans la variation de la force électromotrice, et tout autre modification physique différente qu'on ne connait pas F (a, b, c).

Pour écrire l'équation de la conservation il y a deux manières, les plus probables.

On peut supposer :

1°) Que la modification mécanique et la modification physique se produisent en même temps, indépendement l'une de l'autre, mais ayant la même cause.

Dans ce cas on a :

$$(I)\quad \frac{I^2}{2k}dv - \frac{I'^2}{2k'}dv' + \frac{I_1^2}{2k_1}dv_1 - \frac{I_1'^2}{2k_1'}dv_1'$$

$$= \int_{v_1}^{v} T\,dv + (V - V' + V_1' - V_1)\ dq + F\ (a, b), c).$$

2°) Que la modification physique n'est que le réultat de la modification mécanique, et alors l'équation précédente devient

$$(I')\quad \frac{I^2}{2k}dv - \frac{I'^2}{2k'}dv' + \frac{I_1^2}{2k_1}dv_1 - \frac{I_1^2}{2k_1'}dv_1'$$

$$= \int_{v_1}^{v} T\,dv = (V - V' + V_1' - V_1)\ dq + dF\ (a, b, c).$$

Cette dernière interprétation concorde mieux avec les idées qu'on se fait généralement sur le magnétisme.

L'électrode b étant en dehors du champ magnétique

$$I' = I_1' = 0$$

posons $E = (V - V' + V_1' - V_1)$

l'équation (1') devient

$$(2)\quad \frac{I^2}{2k}dv - \frac{I'^2}{2k'}dv' = E\,dq + dF\ (a, b, c)$$

l étant l'équivalent électrochimique et δ la densité du corps

$$dv = \frac{ldq}{\delta}$$

$$dv' = \frac{l'dq}{\delta'}$$

on a l'équation simplifiée

$$(2')\quad \left(\frac{l}{\delta}\frac{I^2}{2k} - \frac{l'}{\delta'}\frac{I'^2}{2k}\right) dq = E dq + dF\ (a, b, c).$$

Cette dernière équation se simplifie encore par l'introduction des hypothèses verifiées par les expériences suivantes : premièrement, que le champ magnétique n'a aucune influence sur le transport des ions, deuxièmement, que le fer se dépose en a dans le même état physique qu'il était sur b : $\frac{l}{\delta} = \frac{l'}{\delta}$. $dF\ (a, b, c) = 0$ il reste :

$$(3)\quad \left(\frac{I^2}{2k} - \frac{I'^2}{2k'}\right)\frac{l}{\delta} = E$$

Si le premier membre est positif $\frac{I^2}{2k} > \frac{I'^2}{2k'}$, E est positif.

c. a. d. le courant va de a vers b dans le circuit extérieur de la pile, donc a est positiv par rapport à b.

D'après les expériences faites, la force électromotrice d'aimantation est toujours positive toutes les fois que la surface de contact ne forme pas un pôle magnétique. Pour ce cas et dans une première approximation

$$\text{pour } H = 1000$$
$$k = 3$$

$$\frac{I'}{2k} = \frac{H^2}{2k\left(\frac{1}{k}+2\pi\right)^2} \text{ est de l'ordre } 10^5$$

$$\text{Dans le liquide } \frac{I'^2}{2k^2} \text{ est de l'ordre } 10$$

On peut négliger ce dernier terme et l'équation devient

$$(4) \quad E = \frac{l}{\delta}\frac{I^2}{2k}$$

L'expérience montre en effet que la force électromotrice est indépendante du sens de l'aimantation, qu'elle s'exprime en fonction du champ magnetique par des courbes qui rappellent l'allure de l'Intensité d'aimantation en fonction du champ magnétique. On ne saurait prétendre calculer ces courbes à priori par la formule (4) á càuse de l'incertitude de la valeur de I et à cause de la variation de k, on peut seulement avoir une indication.

Dans toutes les expériences, très nombreuses du reste, effectuees sur les différents échantillons de fer et pour divers acides, la forme de la courbe est toujours la même, les valeurs relatives au même champ magnétique dépendent de l'échantillon employé.

Pour H = 2000 C. G. S. cette force électromotrice est de l'ordre du $\frac{1}{100}$ volt.

Les fils de nickel donnent une force électromotrice de l'ordre du millième de volt pour les mêmes champs.

Avec le bismuth on a une force électromotrice de l'ordre du dix-millième de volt et elle est de sens contraire.

Maintenant si nous disposons l'électrode aimantable de sorte que la surface de contact, ait une densité magnétique, c. a. d. soit un pôle, on trouve une force électromotrice beaucoup

plus petite, tantôt positive, tantôt négative ; suivant que la dissolution est peu riche ou très riche en sels de fer. Cette variation tient donc à l'état magnétique de la dissolution. On ponrrait l'expliquer si l'on suppose que dans la formule (3) $\frac{I'^2}{2k'}$ varie avec l'orientation de la surface de contact de l'électrode et avec l'état de la dissolution. E deviendrait négatif pour $\frac{I'^2}{2k'} > \frac{I^2}{2k}$. Cela serait possible, dans l'hypotèse que la surface de contact étant un pôle, attirerait les particules de fer, de sorte que tout près de cette surface, dans une couche de passage, l'intensité d'aimantation serait plus grande que sur l'électrode même.

Dans cette maniere de voir, on s'explique très bien les divergences, qui existaient entre les différents expérimentateurs.

La considération que je viens d'exposer sur le changement de signe de la force électromotrice, par l'état magnétique du liquide, se trouve encore mieux verifiée dans les expériences faites récemment sur les ferronickels (que je dois à l'obligence de M. Guillaume).

Les alliages sur lesquels j'ai travaillé sont en fil de 0.05 c. m. de diamètre et de trois compositions : 44, 28 et 24 pour cent de nickel.

Le dernier ne m'a pas donné des forces électromotrices par la première disposition de l'électrode (les champs magnétiques étaient beaucoup plus faibles que dans les premières expèriences), mais dans la seconde position, lorsque la surface de contact est un pôle, il y avait une force électromotrice négative d'autant plus grande, que l'acide était plus énergique, et que la pile était formée depuis plus longtemps.

Donc d'une manière générale le fer le plus aimanté devient positif par rapport à celui moins aimanté. Ceci a été verifié depuis aussi par M. M. Lala et Fournier [1]) et par M. Paillot [2]).

Il s'ensuit que dans une pile fer aimanté-acide-fer neutre, le fer se transportera par le courant de l'électrode neutre sur l'électrode aimantée.

Donc si l'on prenait la precaution de supprimer toute oxydation et toute autre action chimique, l'électrode aimantée augmentera du poids que perdra l'électrode non aimantée.

Pratiquement comme la force électromotrice d'aimantation est très faible, il faudrait laisser la pile agir longtemps ; dans ces conditions le fer déposé donnerait naissance à des actions

1) C. R. t. CXXIII p. 801.
2) Communiqué par l'auteur.

secondaires qui voileraient complètement le résultat. Pour vérifier la conclusion pécédente on peut précéder d'un autre manière, en obtenant, avec des forces électromotrices convenables, le dépôt électro-chimique des métaux magnétiques, dans des forts champs magnétiques. Lorsqu'une telle cathode se trouve dans un champ magétique, il y a entre ses parties différement aimantées une force électromotrice qui donne naissance à des courants se superposant au courant principal.

Les expériences dont une partie seulement a été publiée, [1]) m'ont fait voir que dans ces dépôts, le métal magnètique se dépose en plus grande quantité sur les parties les plus aimantées de la cathode. En même temps il y a des courants circulaires, dont le plan est normal au champ magnétique et dont la vitesse de rotation est d'autant plus grande que le liquide est plus magnétique.

Sur une cathode en tôle de fer disposée normalement à la direction moyenne d'un champ non uniforme, le dépôt se fait suivant des circonférences concentriques d'autant plus épaisses que le champ est plus intense.

Donc en résumé.

1°) Les corps magnétiques par l'aimantation deviennent moins attaquables par les acides qu'à l'état neutre;

2°) Dans un système corps aimanté—acide—corps neutre, le corps neutre se transporte sur le corps aimanté;

3°) Sur une electrode aimantée le dépôt électrolytique d'un corps magnétique se fait plus abondant sur les parties les plus aimantées.

Le contraire de toutes ces propriétés pour les corps diamagnétiques.

Il serait intéressant de pousser plus loin ces expériences et d'étudier la variation de cette force électromotrice par rapport à la température et pour des champs magnétiques plus forts, pour voir si la force électromotrice ne passe pas par un maximum.

Ces phénomènes nous donneront peut être un jour la possibilité de pénétrer plus loin dans le mécanisme intime des modifications magnétiques, ce ne sera qu'après qu'on pourra envisager une théorie plus appropriée du magnétisme.

Dr. Hurmuzescu

Laboratoire de physique—Iassy

15 Iunie 1900.