

## Magnétostriction. Instabilité Moléculaire

PAR

M. Dr. HURMUZESCU

Professeur à l'Université de Jassy.

On sait que par aimantation les corps ferromagnétiques éprouvent des modifications très importantes; les variations de leurs énergies, dans l'aimantation, se traduisent, au moins en partie, par des effets mesurables à l'extérieur.

Ainsi par l'application à un tel système du principe de la conservation de l'énergie, on peut trouver les forces électromotrices d'aimantation d'une pile à électrodes en fer. L'électrode aimantée devient positive, c'est à dire qu'elle est moins attaquée par l'acide que l'électrode non aimantée \*).

La magnétostriction ou la déformation mécanique des corps ferromagnétiques due à l'aimantation, constitue un autre fait non moins important de ces modifications magnétiques.

Cette question a été étudiée par un grand nombre de physiciens depuis la découverte du phénomène par Joule (1847 \*\*).

Quant aux explications théoriques auxquelles se sont exercés les plus brillants esprits et les plus distingués des physiciens, elles sont encore loin de présenter un tout complet et définitif.

\*) Voir du même auteur. Les modifications physiques dues à l'aimantation—Rapport au Congrès International de Physique 1900, t II. page. 557 et suivantes.

\*\*\*) Joule Phil. Mag. [3] XXX p. 75.

Les théories de Helmholtz, de Maxwell, de Hertz, de Kirchhoff, à cet égard, pour ne citer que les géants de la physique, ne nous donnent par une idée satisfaisante du mécanisme intérieur des corps magnétiques.

Et pourtant l'on sent très bien, ou mieux l'on désire, que de l'étude de ces phénomènes l'on puisse tirer des conclusions relativement à la constitution et au mécanisme de ces systèmes.

Les résultats généraux connus peuvent se resumer de la manière suivante, pour les variations de longueur.

Les déformations sont proportionnelles au carré de l'intensité d'aimantation (Joule), comme étant dues à l'énergie absorbée par l'aimantation. L'allongement du fer et de l'acier passé par un maximum, croît au commencement dans les champs magnétiques, après quoi l'allongement diminue, devient zéro et change de signe, donc après cette valeur du champ magnétique le fer se raccourcit; le contraire se passe pour le cobalt (Bidwell <sup>1</sup>).

Le nickel se raccourcit, tendant vers une valeur limite.

Le ferronickel, s'allonge tendant vers une valeur limite (Nagaoka 1907 <sup>2</sup>).

Pour les variations de volume les expériences sont moins concordantes, car elles sont aussi beaucoup plus difficiles; ces variations étant très petites: de l'ordre du millionième, et l'influence de la température se faisant beaucoup sentir. Joule n'avait trouvé qu'un allongement, mais pas de variation de volume, donc il devait y avoir une contraction transversale. Cantone <sup>3</sup> (1890) trouve le même résultat; Bidwell <sup>4</sup> (1894) trouve une variation de volume. Nagaoka <sup>5</sup> (1900) trouve une augmentation de volume des substances ferromagnétiques par l'aimantation.

En dehors de ces déformations on connaît les torsions des fils de fer éprouvés par l'aimantation (A. Wiedemann <sup>6</sup>)

1) C. Bidwell Proc. Royal Soc. t. XXXVI—1894.

2) H. Nagaoka et K. Honda Journal de Physique [4] t. P. p. 627.

3) Cantone. Mem. Accadem. d. Lincei t. VI p. 489.

4) Bidwell. Proceed. Royal Soc. t. XXXVI p. 94.

5) Nagaoka. Rap. Congrès Inter. Phys. Paris, t. II p. 542.

6) Voir aussi le travail cité plus haut.

1837) et réciproquement par torsion on modifie l'aimantation.

De même par traction on modifie l'aimantation; Ewing, le premier, a observé ce phénomène.

Ainsi donc entre la déformation et l'aimantation il existe une réciprocity.

Cela nous montre la voie à suivre pour trouver une formule de relation entre la cause et l'effet.

Mais si l'effet extérieur est susceptible de mesure, la cause se complique par l'action d'un champ intérieur, à côté du champ extérieur connu.

C'est pour cette raison que les explications théoriques proposés par les plus éminents des physiciens, n'ont pas eu le don de solutionner d'une manière complète le problème.

Les théories de Helmholtz, Maxwell, Hertz, Kirchhoff ne nous donnent qu'un faible aperçu du mécanisme intérieur des corps magnétiques.

Et pourtant on a la conviction que l'étude de ces phénomènes devait nous conduire à une connaissance plus juste de ces mécanismes, c'est à dire que de ces phénomènes l'on puisse tirer des conclusions relativement à la constitution et au mécanisme de ces systèmes.

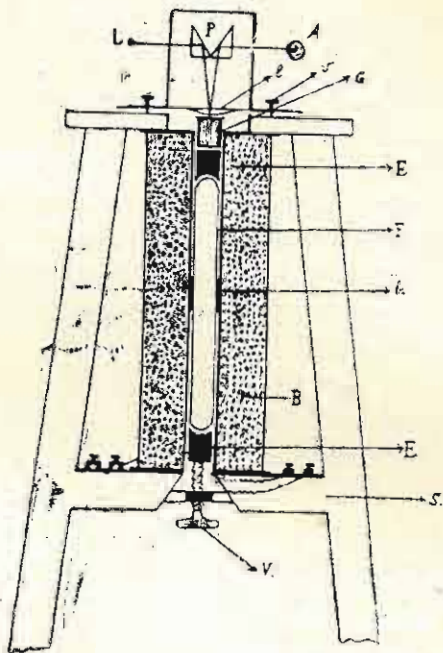
Dans le présent mémoire nous nous sommes contenté d'étudier de plus près les points intéressants de ces déformations, comme p. ex., le maximum de l'allongement.

## La méthode expérimentale.

Fig. 1.

L'appareil que nous avons employé se compose d'une bobine à gros fil de cuivre, 3 m. m. de diamètre, isolé par deux couches de soie; la bobine a une longueur de 50 c. m.

en hauteur et comprend 20 couches de fil; Le nombre des spires par c. m. est 3, 3.



Le champ intérieur est aproximativement  $H=4 \pi n I=4 \pi n I_a 10^{-1}=83 I_a$ .

Le champ maximum pour 30 ampères sera  $H=2490$  gauss.

L'espace intérieur libre, dans lequel on met les échantillons ferromagnétiques à étudier, forme un cylindre vide de 3,5 c. m. de diamètre sur 50 c. m. de longueur.

La bobine est fixée sur un trépied très solide en bois de chêne, et ayant la possibilité du libre jeu sans entrainer les autres pièces qui supportent l'échantillon à expérimenter et le système très délicat de la mesure de la variation de longueur.

De sorte que, si par le passage du courant il en résultait la moindre déformation de la bobine, cette action n'aurait aucune influence sur nos mesures.

L'échantillon à étudier était supporté par une vis dont

l'écrou était fixé bien solidement sur la partie massive d'un pied du support.

Les échantillons occupaient exactement le milieu suivant l'axe de la bobine cylindrique, ils étaient compris et dirigés par deux pièces *d d* en ébonite tournées sur le tour, ayant la forme des sections coniques creuses.

Le dispositif permettait le maintien d'une température constante par l'introduction d'une double enceinte dans l'âme de la bobine; le corps à expérimenter se trouvant ainsi au milieu de cette enceinte.

Pour utiliser les champs constants et pour supprimer le plus possible les forces démagnétisantes, tous les corps ferromagnétiques employés avaient la forme d'un ellipsoïde très allongé ayant le grand axe d'une longueur commune de 21 c. m. et pour le petit axe des valeurs variables depuis 0,2 c. m. jusqu'à 1,6 c. m.

### Mesure de la variation de longueur.

Pour mesurer la variation de longueur nous avons employé la méthode des anneaux d'interférence de Fizeau <sup>1)</sup>. On obtenait les anneaux entre une glace noire plane supportée par l'échantillon et une lentille convexe *l* solidaire d'un support très stable et indépendant de la bobine fixée dans le support, comme on voit sur la figure 1, et dont les vis *v* permettait le réglage, pour amener les anneaux dans le champ du viseur; deux prismes *P* à réflexion totale servaient à amener les rayons de lumière monochromatique et à voir les anneaux avec une loupe viseur. fig. 1.

Tout l'appareil a été très soigneusement construit par M. Ph. Pellin-Paris, surtout en ce qui concerne la partie optique, le reste a été modifié et complété par M. I. Bainschi, le mécanicien en chef du laboratoire.

Cette méthode nous a semblé plus appropriée pour le but proposé, car elle permettait de suivre le phénomène dans tous ses changements et surtout, pendant ses modifications continues; car, comme nous allons montrer plus loin, si l'on dé-

<sup>1)</sup> Cette méthode a été employée précédemment aussi par M. A. Berget. C. R. CXV. p. 722, 1892; Journal de Physique (3) II p. 172; 1892.

termine chaque allongement en partant chaque fois du champ zéro, on risque d'avoir les résultats faussés par l'hystérèse du champ et par l'hystérèse élastique, si on n'a pas ramené le corps ferromagnétique à l'état neutre.

Même dans ces conditions la déformation est beaucoup plus grande, lorsqu'on fait augmenter le champ magnétique d'une manière successive, que lorsqu'on fait croître brusquement le champ entre les mêmes valeurs.

Comme sensibilité nous avons facilement le 0,1 d'un anneau, c'est à dire  $0,1 \times \frac{1}{4} \cdot 0,589$  avec la lumière du sodium; cela nous a paru suffisant pour ce genre d'expérience. En effet les quantités à mesurer dans ce cas, variant d'un échantillon à l'autre, et pour le même échantillon suivant les opérations antérieures, qu'il avait subit, on ne peut espérer avoir leur valeurs absolues, mais leurs valeurs relatives, dans leur allure générales.

### La mesure du champ magnétique.

Cette mesure se faisait par la méthode du galvanomètre ballistique<sup>1)</sup>. Dans l'espace annulaire de la grande bobine  $e$  autour de l'échantillon il y avait une petite bobine  $b$  en communication avec un galvanomètre ballistique S. H. de grande sensibilité. Le nombre des spires et leurs surfaces étant déterminé dès le commencement, la constante du galvanomètre étant connue par des expériences préalables, il ne restait à mesurer chaque fois que l'impulsion  $\alpha$  du ballistique.

Les champs magnétiques employés ont été compris entre 0—2500 gauss.

### Résultats généraux.

Les fers et les aciers commencent par s'allonger avec les champs croissants, passent par un maximum puis décroissent, reviennent à la longueur primitive, puis décroissent d'une manière continue.

Ce maximum d'allongement se présente pour des champs d'autant plus faible, que le fer est plus doux.

<sup>1)</sup> Une partie de ces expériences ont été exécutées par M. P. Polesco licencié es sciences.

Le raccourcissement est d'autant plus grand que le fer est plus doux—ainsi avec certains échantillons nous avons pu constater jusqu'à un raccourcissement de 30 anneaux pour les plus grands champs magnétiques employés [—2500 gauss]; cela fait  $\frac{30 \times 0,589 \mu}{2}$  et pour le raccourcissement relatif approximativement  $\frac{1}{30.000}$ .

Pour les aciers le point de maximum d'allongement est plus petit que pour le fer doux et il est déplacé vers les champs plus forts; dans tous les cas les variations sont beaucoup plus faibles que pour les fers doux.

Les nickels se raccourcissent d'une manière continue tendant vers une valeur limite.

Les ferronickels, présentent un allongement continu, lequel pour des champs de plus en plus grands tend vers une valeur limite, voir les courbes respectives, fig. 2.

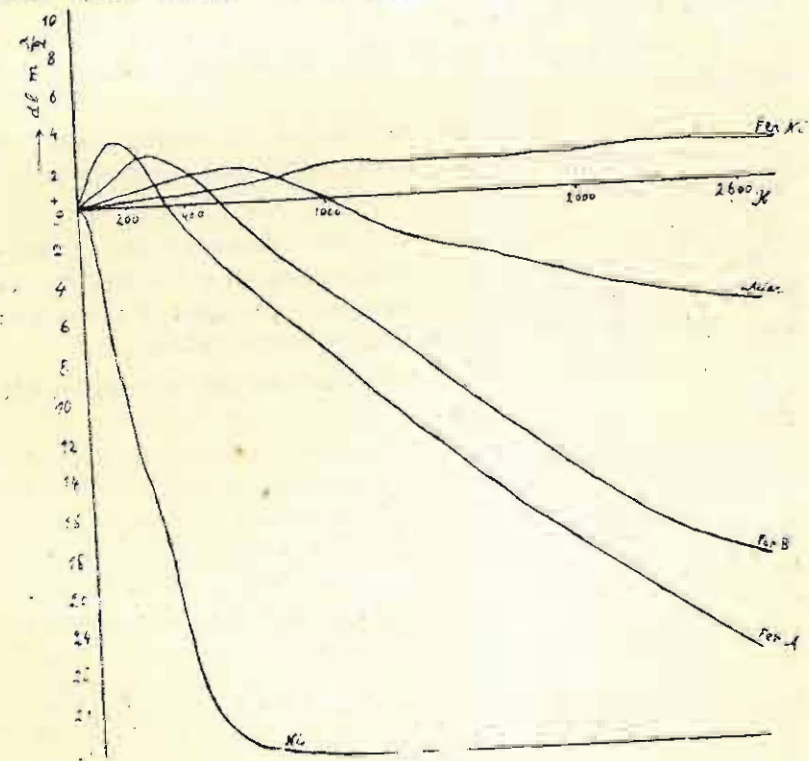


Fig. 2.

Dans ces expériences les résultats peuvent être beaucoup faussés par une déformation permanente, qui disparaît très lentement; ainsi d'une manière générale, après avoir fait passer le courant et avoir ainsi obtenu la variation brusque de longueur par le passage de dix anneaux, p. ex. au fil du réticule, la suppression du champ, donc la variation brusque en sens contraire, ne nous donnera que le passage d'un nombre beaucoup plus petit d'anneaux; un anneau ou deux seulement.

Si au lieu de supprimer complètement le champ magnétique on le diminuait d'une manière lente et progressive on observait le passage lentement d'un nombre d'anneaux, égal à peu près à celui obtenu lors de leurs passage en sens invers, par l'accroissement successif du champ magnétique.

Ainsi on employait d'une manière générale les champs magnétiques lentement croissants et décroissants et de la sorte on obtenait le même nombre d'anneaux autant dans un sens que dans l'autre.

De cette manière on pouvait mieux les compter, leur mouvement étant plus lent.

On obtenait facilement ce résultat en introduisant en série avec la bobine et la source électrique d'alimentation un grand rhéostat continu.

Pour supprimer le magnétisme rémanent de l'échantillon, après chaque série d'expériences ou après chaque expérience s'il le fallait, on renversait le sens du courans dans la bobine à l'aide d'un double commutateur.

Le diagramme de la fig. 3 nous montre les courbes det

mêmes échantillons, pour des champs plus faibles, dans le voisinage du maximum d'allongement du fer doux.

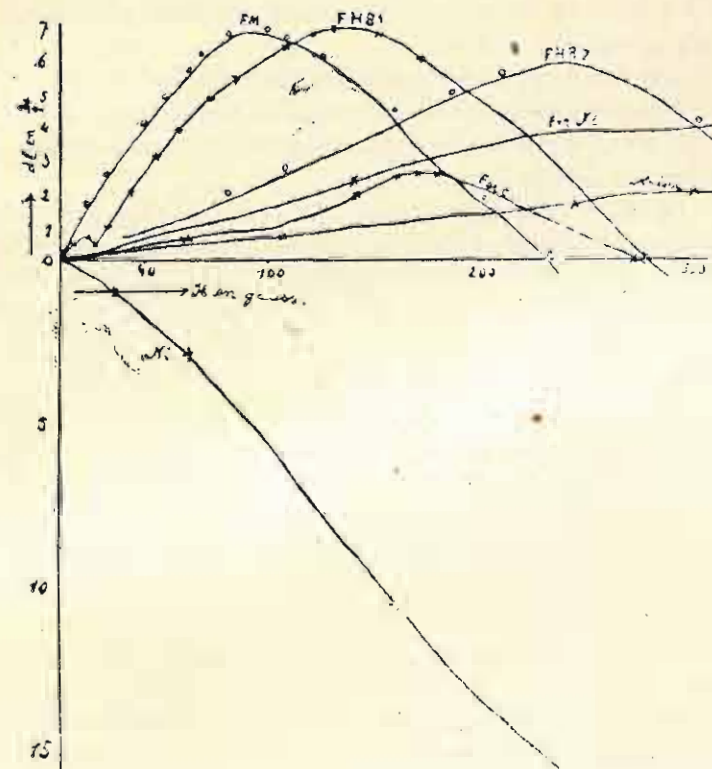


Fig 3.

*L'instabilité moléculaire.* Après avoir étudié l'allure générale du phénomène et vérifié ainsi des résultats trouvés aussi par d'autres expérimentateurs <sup>1)</sup>, nous avons cru plus intéressant de rechercher les points de maximum ou de minimum et d'étudier plus à fond cette partie du phénomène.

En vérité la méthode employée pour la mesure des variations des longueurs par le déplacement des anneaux ne

1) H. Nagaoea. La magnétostriktion. Rapport. Congrès International de Physique Paris 1900 t. II, pag. 536. Journal de physique 1902 p. 627.

présente, pour ainsi dire, aucune inertie et on peut suivre et constater à chaque instant les différentes phases; on verra plus loin comment nous nous sommes pris pour séparer même ces phases.

Un fait très important *d'instabilité moléculaire* se produit lorsque l'on observe la variation de longueur d'une tige de fer doux dans les champs magnétiques au point de maximum de dilatation.

Dans le voisinage du point maximum et après l'avoir un peu dépassé, lorsqu'on établit de nouveau le champ magnétique, à partir d'une petite valeur (près de zéro), on voit, dans la lunette, une dilatation brusque suivie d'une contraction, c'est à dire un nombre d'anneaux qui apparaissent et disparaissent si vite qu'on ne peut pas bien les compter.

Cette *instabilité moléculaire* ne se présente que pour le fer doux, elle n'apparaît pas avec l'acier, lequel présente pourtant le maximum d'allongement.

Dans ce but nous avons essayé un grand nombre d'aciers au chrome et au tungstène.

Les aciers au nickel ne présentant pas de maximum de dilatation, ne présentent pas non plus ce phénomène.

Pour trouver sûrement et avec exactitude ce point, nous avons employé le dispositif cité déjà, en faisant augmenter progressivement les champs magnétiques à l'aide d'un rhéostat continu. En diminuant la résistance, le courant augmente le champ croît, les anneaux apparaissent; à mesure que l'on approche du point M, le déplacement des anneaux devient plus faible; au point M même il est nul. En passant sur la courbe de l'autre côté de ce point les anneaux commencent à disparaître.

C'est ici le point cherché; en effet, si dans cette position du rhéostat on supprime le champ et après quelque temps on le rétablit de nouveau, on constate l'instabilité moléculaire (apparition et disparition brusque des anneaux).

On trouve facilement ce point, et il est d'autant plus sensible que le fer est plus doux.

Pour certains échantillons et dans certaines conditions, nous avons trouvé deux points sensibles d'instabilité moléculaire *m* et *M*, voir la courbe F. H. B., fig. 3, et fig. 4.

Nous donnons ci joint quelques valeurs de ces *champs critiques* pour les échantillons ferromagnétiques présentant de l'instabilité moléculaire.

Echant.	Courbe	Hen gann	al en ef.
Fer H. B. 15,2	F. H. B <sub>1</sub>	138,0	7,1
Fer H. B. 22,6	F. H. B <sub>2</sub>	237,9	6,0
Fer Fils	F. F.	83,4	6,2
" M. 9	F. M <sub>1</sub>	105,7	6,8
" M. 15	F. M <sub>2</sub>	174,8	5,0
" M. 13	F. M <sub>3</sub>	145,9	5,75
" M. 10,8	F. M <sub>4</sub>	115,7	6,25

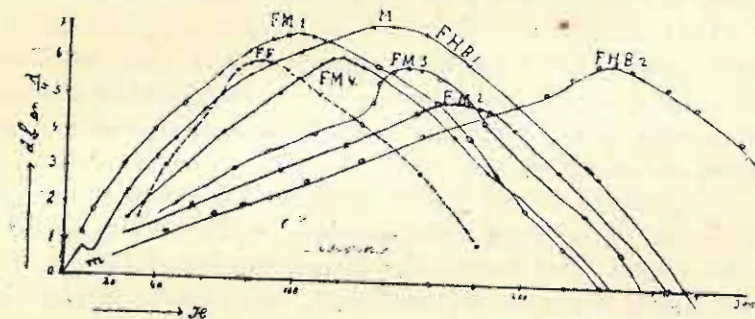


Fig. 4.

Ce point d'équilibre instable moléculaire présente une certaine importance théorique, car il nous donne la possibilité d'envisager certaines explications pour la constitution des corps magnétiques.

Elle rend plausible l'hypothèse des espaces intermoléculaires, de l'orientation moléculaire et des liaisons entre ces particules. Sans cette dernière propriété, l'élévation de la température devrait rendre cette mobilité encore plus grande; mais l'expérience nous montre que le point critique se trouve déplacé par la température vers les champs plus forts <sup>1)</sup> ce qui correspond à une force de liaison plus grande, entre les molécules <sup>2)</sup>, M. P. Weiss dans son intéressant travail

1) H. Nagaoka Magnétostriction. Rapp. Congrès Inter Ph. voir 1910. t. II p. 541.

2) Voir P. Weiss. Journal de Physique. (3) t. VI. page 690.

sur le champ moléculaire interne pense „que le mécanisme de ces phénomènes et d'autres phénomènes voisins réside dans l'altération du champ moléculaire“.

Une conséquence naturelle de ce fait d'instabilité moléculaire c'était de se demander si en employant des corps magnétiques, dont les liaisons moléculaires soient plus faibles encore que dans les fers doux, on n'obtiendrait pas une telle instabilité, mais beaucoup plus sensible et d'une amplitude beaucoup plus grande.

Pour la réalisation de cette idée nous avons essayé de composer des substances ferromagnétiques, à l'aide de la limaille de fer emprisonnée dans de la paraffine ou de la cire.

Mais dans ces systèmes, il faut tenir compte du fait que la perméabilité du corps ainsi obtenu est beaucoup plus faible que celle du fer doux et que les grains de limaille sont encore loin d'approcher les faibles dimensions des aimants moléculaires.

L'importance du point critique moléculaire est de concrétiser jusqu'à un certain point les théories moléculaires du magnétisme basées sur l'arrangement et l'orientation des aimants élémentaires (molécule, magnéton) qui entrent dans la composition des corps magnétiques.

Nous savons que Ewing, prenant les hypothèses de Weber, a cherché à traduire par expérience ces idées, en expérimentant sur un grand nombre de petites aiguilles magnétiques. Expériences reprises en dernier par M. M. de la Rive et Guye <sup>1)</sup>.

Dans ces expériences les figures que prennent ces différents aimants sous l'action de leur attraction et leur répulsion réciproque, peuvent donner naissance, lorsqu'on fait agir un champ extérieur de plus en plus grand à un état d'équilibre instable, c'est à dire que pour un certain champ (le champ critique) les petits aimants se trouvent dans un équilibre instable; pour une petite variation du champ ils prennent une autre configuration.

<sup>1)</sup> Sur l'orientation magnétique dans une agglomération des petits aimants. Archives des Sciences Physiques et Naturelles (4) t. XXVIII p. 105.

Il en résulterait, qu'avant le maximum de notre courbe, prédomineraient les premiers groupements, tandis qu'après ce point les seconds groupements deviendraient plus nombreux.

Or Ewing explique l'état magnétique par un groupement des aimants moléculaires suivant une certaine configuration d'équilibre stable M, et l'état non magnétique par un autre groupement d'équilibre stable N.

Il serait à supposer qu'un corps ferromagnétique à l'état neutre ne comprendrait que des groupements N; mais à mesure que le champ extérieur agit les groupements, M, se forment en plus nombreux par cette orientation le fer change de longueur.

Ces états M et N correspondraient au fer  $\alpha$  et en fer  $\beta$  dans la théorie d'Osmond <sup>1)</sup>.

Pour une certaine valeur du champ un grand nombre de ces groupements passent rapidement de l'état N à l'état M par un équilibre instable.

A cette position devrait correspondre un point d'inflexion sur la courbe d'aimantation.

Mais, quelle est la relation entre la déformation du corps magnétique et le champ magnétisant qui la provoque?

Dans sa théorie Kirchoff arrive par des considérations élastiques et magnétiques aux formules dans lesquelles l'intensité d'aimantation I et le champ magnétique H sont liés de la manière suivante

$$I_x = [k - k' (\lambda_x + \lambda_y + \lambda_z) - k''\lambda_x] H_x$$

$$I_y = [k - k' (\lambda_x + \lambda_y + \lambda_z) - k''\lambda_y] H_y$$

$$I_z = [k - k' (\lambda_x + \lambda_y + \lambda_z) - k''\lambda_z] H_z$$

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  étant les dilatations linéaires; k, k', k'' sont trois constantes caractérisant le corps magnétique.

Les forces élastiques se réduisent à l'intérieur: à une pression uniforme

$$P = \frac{IH}{8\pi} - \frac{k'H^2}{2}$$

et à une tension suivant le champ

$$T = \frac{IH}{4\pi} - \frac{k'H^2}{2}$$

<sup>1)</sup> F. Osmond Phil. Mag. (5) t. XXIX p. 511; 1890.

L'application qu'en a faite Cantone à un ovoïde, a donné pour la variation de longueur relative :

$$\frac{\Delta l}{l} = \left[ \frac{4\pi k^2}{3} \frac{1+\theta}{1+2\theta} + \frac{k-k'}{2(1+2\theta)} - \frac{k''}{2} \right] \frac{H^2}{E}$$

et pour celle de l'unité de volume

$$\frac{\Delta v}{v} = \left[ \pi k^2 + 3 \frac{(k-k')}{4} - \frac{k''}{1} \right] \frac{H^2}{K(1+3\theta)}$$

E, représente le module de Young, K, le module de rigidité,  $\theta$ , une certaine constante définie par la relation

$$K = \frac{E}{2} \frac{1+2\theta}{1+3\theta}$$

Ces formules générales comme aussi celles peu différentes obtenues par J. J. Thomson, Hertz et Duhem conduisent, pour les cas limites applicables, à une traction  $\frac{I^2}{8\pi}$  suivant les lignes du champ et à une pression uniforme  $\frac{1}{2}k H^2$ , identique au système de Maxwell appliqué aux diélectriques.

Mais la simple considération de ces formules ne nous donne pas le sens et la valeur exacte de la déformation, qu'à la condition expresse de connaître expérimentalement la réciprocité entre la cause et l'effet.

Cette dernière relation connue, unie au principe de la conservation de l'énergie, pourrait nous donner la possibilité de prévoir d'avance le sens du phénomène.

La considération d'un champ magnétique critique nous conduit à admettre, que par la magnétisation les corps éprouvent une contraction de volume. Cela a été prouvé par les expériences de Nagaoka.

Mais la valeur de cette contraction étant très petite et d'un autre côté faussée par les variations de la température, n'a pas été trouvée également par tous les expérimentateurs qui se sont occupés de cette question ; il y en a même qui ont trouvé des résultats contraires.

Dans un autre mémoire nous nous occuperons plus en détail de ces questions.