

N° D'ORDRE :

81

# THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES  
DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

**R. PAUTHENET**

**1<sup>re</sup> THÈSE.** — LES PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DES FERRITES  
D'YTTTRIUM ET DE TERRES RARES DE FORMULE  
 $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{M}_2\text{O}_3$ .

**2<sup>e</sup> THÈSE.** — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 11 janvier 1957 devant la Commission d'examen.

MM. L. NÉEL ..... *Président.*

M. FALLOT ..... }

L. WEIL ..... }

Y. AYANT ..... }

*Examineurs.*

**PARIS**

**MASSON ET C<sup>ie</sup>, ÉDITEURS**

LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

1958

# UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

## FACULTÉ DES SCIENCES

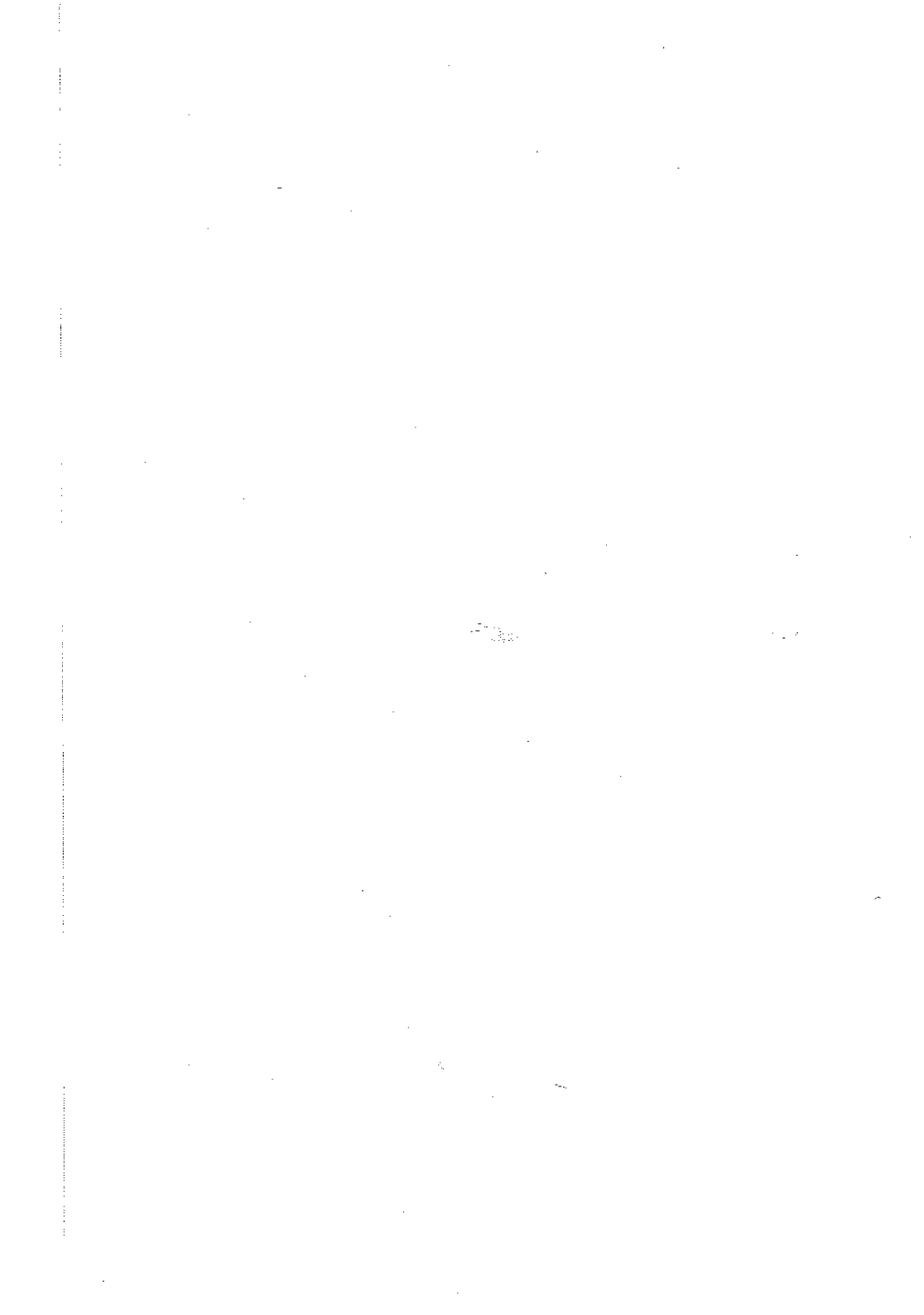
|                                                          |                   |                                                        |
|----------------------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------|
|                                                          | MM.               |                                                        |
| <i>Doyens honoraires</i>                                 | GAU, FORTRAT.     |                                                        |
| <i>Doyen</i> .....                                       | MORET.            | Correspondant de l'Institut.                           |
| <i>Professeurs hono-<br/>raires</i> .....                | { FAVARD.....     | Professeur à la Sorbonne (Math.).                      |
|                                                          | { FORTIER.....    | Professeur à la Sorbonne (Méca-<br>nique des fluides). |
|                                                          | { BRELOT.....     | Professeur à la Sorbonne (Math.).                      |
|                                                          | { DE LITARDIÈRE.  | Botanique.                                             |
| <i>Professeurs</i> .....                                 | { FORTRAT.....    | Physique générale, Correspondant<br>de l'Institut.     |
|                                                          | { MORET.....      | Géologie et Minéralogie, Membre<br>de l'Institut.      |
|                                                          | { ANDRIEUX.....   | Chimie, Correspondant de l'Insti-<br>tut.              |
|                                                          | { NÉEL.....       | Physique expérimentale, Membre<br>de l'Institut.       |
|                                                          | { PARDE.....      | Hydrologie fluviale.                                   |
|                                                          | { DORIER.....     | Zoologie.                                              |
|                                                          | { HEILMANN.....   | Chimie.                                                |
|                                                          | { KRAVTCHEKO .    | Mécanique rationnelle.                                 |
|                                                          | { BENOIT.....     | Radio-Électricité.                                     |
|                                                          | { CHÈNE.....      | Chimie papetière.                                      |
|                                                          | { NOBÉCOURT...    | Micrographie papetière.                                |
|                                                          | { WEIL.....       | Physique.                                              |
|                                                          | { FÉLICI.....     | Physique.                                              |
|                                                          | { KUNTZMANN...    | Analyse appliquée.                                     |
|                                                          | { DODERO.....     | Électrochimie, Electrométallurgie.                     |
|                                                          | { BARBIER.....    | Géologie appliquée.                                    |
|                                                          | { SANTON.....     | Mécanique des fluides.                                 |
|                                                          | { OZENDA.....     | Botanique.                                             |
|                                                          | { CHABAUTY.....   | Calcul différentiel et intégral.                       |
|                                                          | { FALLOT.....     | Physique.                                              |
| <i>Professeurs sans<br/>chaire</i> .....                 | { REULOS.....     | Physique.                                              |
|                                                          | { TRAYNARD.....   | Chimie.                                                |
|                                                          | { SILBER.....     | Mécanique des fluides.                                 |
|                                                          | { GALVANI.....    | Mathématiques.                                         |
| <i>Maître de Confé-<br/>rences hono-<br/>raire</i> ..... | { REEB.....       | Mathématiques.                                         |
|                                                          | { OFFNER.....     | Botanique.                                             |
| <i>Maîtres de Confé-<br/>rences</i> .....                | { SOUTIF.....     | Physique.                                              |
|                                                          | { GRAYA.....      | Mécanique, Physique.                                   |
|                                                          | { LUTZ (Mlle).... | Mathématiques.                                         |
|                                                          | { AYANT.....      | Physique.                                              |
|                                                          | { MICHEL.....     | Géologie.                                              |
|                                                          | { GALLISSOT.....  | Mécanique.                                             |
|                                                          | { MOUSSIEGT....   | Electrotechnique.                                      |
|                                                          | { BONNIER.....    | Chimie.                                                |
|                                                          | { BOUCHEZ.....    | Physique nucléaire.                                    |
| <i>Secrétaire Général</i>                                | GRENIER.          |                                                        |
| <i>Secrétaire</i>                                        | RICHET            |                                                        |

A MONSIEUR L. NÉEL  
Membre de l'Institut,  
Directeur du Laboratoire d'Electrostatique  
et de Physique du Métal.

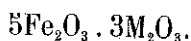
*Hommage respectueux et reconnaissant.*



A MES PARENTS



# LES PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DES FERRITES D'YTTRIUM ET DE TERRES RARES DE FORMULE



Par R. PAUTHENET

## SOMMAIRE

Nous avons montré la différence existant entre les propriétés magnétiques des deux ferrites de terres rares :  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{M}_2\text{O}_3$ , à structure pérovskite et  $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{M}_2\text{O}_3$ , à structure grenat. Notre étude est consacrée aux ferrites à structure grenat. A une température donnée, l'aimantation est en général la résultante d'un terme ferromagnétique et d'un terme paramagnétique. Les variations de l'aimantation spontanée du terme ferromagnétique avec la température présentent un point de compensation magnétique pour les ferrites avec Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm ; les points de Curie sont au voisinage de  $550^\circ \text{K}$ . Les propriétés magnétiques de ces ferrites s'interprètent par un comportement ferrimagnétique des ions fer sur les sous-réseaux *a* et *d* ; à son tour l'aimantation résultante de ces ions forme un assemblage ferrimagnétique avec celle des ions terres rares sur le sous-réseau *c*. On peut ainsi rendre compte du terme paramagnétique. Les valeurs des moments à saturation absolue montrent que les moments des ions terres rares sont partiellement bloqués aux basses températures par un fort champ cristallin dissymétrique. Nous avons déterminé les valeurs des coefficients de champ moléculaire représentant les intensités des différentes interactions entre ions magnétiques et calculé les courbes de variation thermique de l'aimantation spontanée et de la susceptibilité paramagnétique. Nous en avons déduit les valeurs du paramètre *u* représentant les interactions d'échange entre deux ions magnétiques voisins ; on montre qu'elles sont une fonction de la distance entre couches magnétiques ; la courbe correspondante peut être reliée de façon continue à la même courbe tracée pour les métaux ; elle précise le caractère des interactions de superéchange.

## PRÉAMBULE

Les deux premiers chapitres de notre thèse ont été consacrés à l'étude des propriétés magnétiques de monocristaux de substances ferromagnétiques parmi les plus anciennement connues : l'hématite et la pyrrhotine <sup>(1)</sup>. Le troisième chapitre, par contre, qui fait l'objet de cette publication, est relatif à une série de corps ferromagnétiques récemment découverts : les ferrites de terres rares.

Sur ces différentes substances, nous avons mesuré la variation de l'aimantation en fonction du champ magnétique et de la température, par la méthode d'extraction axiale de P. Weiss (39). Cette méthode consiste à extraire brusquement d'un système de bobines induites, suivant l'axe des pôles d'un électro-aimant cuirassé, un échantillon porté à une température entre 2 et 1 000° K environ et placé dans un champ magnétique variable jusqu'à 20 000 Oe. Je ne décrirai pas à nouveau en détail le dispositif expérimental ainsi que les différents étalonnages ; l'exposé en a été fait dans ma thèse d'ingénieur-docteur, consacrée aux aimantations spontanées des ferrites spinelles, à laquelle il suffira de se reporter pour renseignements. J'indiquerai cependant une précision supplémentaire ; dans ce premier travail, la température la plus basse utilisée a été celle de l'hydrogène liquide, avec un vase Dewar en pyrex argenté ; dans ce nouveau travail, les mesures ont été faites jusqu'à la température de l'hélium liquide avec un vase Dewar <sup>(2)</sup> métallique ; j'ai pu vérifier, à la précision de mes expériences, jusqu'à 14° K, que les mesures magnétiques n'étaient pas affectées par les courants induits dans le métal constituant le vase ; à cet effet, j'ai comparé les résultats des mêmes mesures faites dans le vase métallique et dans un vase en pyrex non argenté.

## PREMIÈRE PARTIE

## Les deux ferrites de terres rares.

I. — *Historique.* — Les ferrites de terres rares et le comportement ferromagnétique de ces ferrites ont été découverts par H. Forestier et G. Guiot-Guillain (11) (12) (13). Leurs échantillons étaient préparés en recuisant le mélange coprécipité en égale proportion des oxydes  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

<sup>(1)</sup> Les deux premières parties consacrées aux propriétés magnétiques de l'hématite et de la pyrrhotine ont été résumées dans deux notes aux *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* (1952, 234, 2172 et 2261).

<sup>(2)</sup> Ce vase Dewar a été construit sous les directives de MM. L. Weil et A. Lacaze.

et  $M_2O_3$  dans lequel M est un ion terre rare ; ils ont attribué aux composés obtenus la formule  $Fe_2O_3 \cdot M_2O_3$ . Ces auteurs ont observé que les ferrites obtenus avec Y, Sm, Gd, Tm, Yb présentaient deux points de Curie  $\theta_1$  et  $\theta_2$ , dont les valeurs moyennes dans la série étaient respectivement voisines de  $550^\circ$  et  $650^\circ$  K. Au voisinage du point de Curie  $\theta_2$  ces ferrites présentent la propriété de thermorémanence. Les préparations à base de Nd, Eu, Dy, Er ne possèdent que le point de Curie  $\theta_1$  et pas de thermorémanence ; au contraire, les préparations à base de La et de Pr ne présentent que le point de Curie  $\theta_2$ , avec de la thermorémanence. Pour les différents composés, les températures de ces deux points de Curie décroissent dans le sens de la contraction lanthanidique.

Dans une première étude magnétique, sur des ferrites à base de Gd (35), de Dy et Er (19), préparés dans les conditions indiquées ci-dessus, nous avons remarqué qu'à partir de champs de l'ordre de 5 000 Oe la variation de l'aimantation  $\sigma$  est linéaire en fonction du champ intérieur  $H_i$  est peut être représentée par une expression de la forme :

$$(1) \quad \sigma = \sigma_s + \chi H_i$$

$\sigma_s$  est la valeur de l'aimantation spontanée que prend la substance sous l'effet des différentes interactions magnétiques ;  $\chi$  est la valeur de la susceptibilité d'un terme paramagnétique superposé. En reprenant nos expériences sur différentes préparations de ferrite de gadolinium, nous avons constaté qu'à des températures identiques les valeurs de  $\chi$  étaient les mêmes alors que les valeurs de  $\sigma_s$  étaient dans un rapport constant. D'autre part, les valeurs de  $\sigma_s$  déterminées par M. A. Gilileo (16) (17) sur des monocristaux de  $Fe_2O_3 \cdot Gd_2O_3$  étaient en complet désaccord avec les nôtres. De plus F. Bertaut (5) a montré que le modèle magnétique proposé par L. Néel (23) n'était pas compatible avec la structure pérovskite plus ou moins déformée que G. Guiot-Guillain (20), S. Geller (14) (15) et F. Bertaut et F. Forrat (13) ont observée sur ces ferrites. Enfin, H. Forestier et G. Guiot-Guillain (12) avaient remarqué qu'après un recuit de 6 heures à  $1\,000^\circ$  C l'aimantation à température ordinaire du ferrite d'erbium était environ trois fois supérieure à celle du même ferrite recuit pendant la même durée à  $920^\circ$  C. Il s'agissait de trouver une explication à ces diverses difficultés.

II. — **Les deux ferrites de terres rares :  $Fe_2O_3 \cdot M_2O_3$  et  $5Fe_2O_3 \cdot 3M_2O_3$ .**  
— En augmentant systématiquement la proportion de  $Fe_2O_3$  par rapport à  $Gd_2O_3$ , F. Bertaut et F. Forrat (5) ont remarqué aux rayons X que dans les produits obtenus la phase pérovskite cédait progressivement sa place à une structure nouvelle dont la formule devait être  $nFe_2O_3 \cdot Gd_2O_3$  avec  $n$  inférieur à 2, car pour cette proportion apparaissaient faiblement les raies les plus fortes relatives à  $Fe_2O_3$ . La formule de ce nouveau ferrite a été établie par les rayons X ; elle s'écrit  $5Fe_2O_3 \cdot 3Gd_2O_3$ ,

sa structure est du type grenat. Il devenait alors probable que les mesures antérieures avaient été faites sur un mélange des deux ferrites  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Gd}_2\text{O}_3$  à structure pérovskite et  $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Gd}_2\text{O}_3$  à structure grenat. Les résultats exposés dans les deux paragraphes suivants confirmeront quantitativement cette hypothèse.

III. — *Propriétés magnétiques du ferrite  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Gd}_2\text{O}_3$  à structure pérovskite.* — L'étude a été faite sur des monocristaux <sup>(1)</sup> de  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Gd}_2\text{O}_3$

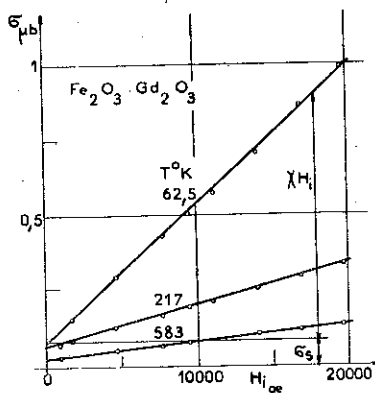


Fig. 1.

entre 4,25 et 698° K (36). Les isothermes  $(\sigma, H_i)$  (fig. 1) peuvent être représentées par l'expression 1 ; les valeurs de  $\sigma_s$  et  $\chi$  ont été déterminées graphiquement à partir des courbes expérimentales  $(\sigma, H_i)$  avec des erreurs maxima estimées respectivement à 2 p. 100 et 5 p. 100. Sur la figure 2, sont représentées en fonction de la température (tableau I) suivant la courbe 1 la variation de l'aimantation spontanée  $\sigma_s$  exprimée en magnétons de Bohr ( $\mu_B$ ) et rapportée à une mole et suivant la courbe 2 la variation de l'inverse de la susceptibilité paramagnétique moléculaire  $\chi_m$  ; la droite 3 représente

la loi de Curie relative aux ions Gd contenus dans la molécule. Remarquons l'analogie dans le comportement magnétique de cette substance avec celui que nous avons observé sur  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \alpha$  (24) : faibles valeurs de  $\sigma_s$ , susceptibilité magnétique superposée. Remarquons également que le point de Curie ferromagnétique  $\theta_f$  est à 668° K.

IV. — *Propriétés magnétiques du ferrite  $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Gd}_2\text{O}_3$  à structure grenat.* — Les aimantations ont été mesurées entre 2,16 et 750° K sur un échantillon polycristallin de  $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Gd}_2\text{O}_3$  pour lequel nous donnons dans le paragraphe 6 des renseignements relatifs à sa préparation, à sa pureté. Dans un grand intervalle de températures, l'isotherme  $(\sigma, H_i)$  (fig. 3) suit la loi 1. Nous constatons cependant que cette loi est valable à partir de valeurs du champ d'autant plus élevées que la température est plus basse : de l'ordre de 1 000 Oe à 285° K, 5 000 Oe à 77° K, supérieures à 20 000 Oe à 4° K. Ce comportement est caractéristique de l'existence d'une très forte anisotropie magnétique aux basses températures. La détermination de  $\sigma_s$  aux températures voisines de celle de

(1) Ces monocristaux nous ont été fournis par M. J. P. Remeika.

TABLEAU I

Valeurs rapportées à une mole de l'aimantation spontanée  $\sigma_s$   
 en magnéton de Bohr  
 et de l'inverse de la susceptibilité magnétique  $\chi_m$ .

| $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Gd}_2\text{O}_3$<br>$\theta_f = 668^\circ \text{K}$ |                  |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------|
| T° K                                                                                   | $\sigma_s \mu_b$ | $1/\chi_m$ |
| 4,25                                                                                   | 0,205            | 0,5        |
| 20,4                                                                                   | 0,112            | 1,53       |
| 33                                                                                     | 0,08             | 1,95       |
| 49                                                                                     | 0,08             | 3,12       |
| 62,5                                                                                   | 0,08             | 3,83       |
| 73,5                                                                                   | 0,08             | 4,5        |
| 103                                                                                    | 0,08             | 6,72       |
| 150                                                                                    | 0,073            | 9,18       |
| 191                                                                                    | 0,068            | 11,68      |
| 217                                                                                    | 0,063            | 12,95      |
| 243                                                                                    | 0,062            | 14,70      |
| 283,5                                                                                  | 0,056            | 16,66      |
| 303,5                                                                                  | 0,049            | 18,3       |
| 334                                                                                    | 0,049            | 20,22      |
| 368                                                                                    | 0,049            | 22,38      |
| 407,5                                                                                  | 0,048            | 25,2       |
| 446                                                                                    | 0,045            | 27,5       |
| 500                                                                                    | 0,041            | 30,41      |
| 535                                                                                    | 0,036            | 31,68      |
| 583                                                                                    | 0,030            | 34,0       |
| 622                                                                                    | 0,019            | 35,10      |
| 648                                                                                    | 0,012            | 36,60      |
| 698                                                                                    | 0                | 37,80      |

| $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Gd}_2\text{O}_3$<br>$\sigma_0 \mu_b = 30,3 \pm 0,3$ ; $\theta_f = 564^\circ \text{K}$ |                  |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------|
| T° K                                                                                                                       | $\sigma_s \mu_b$ | $1/\chi_m$ |
| 2,16                                                                                                                       | 30,25            |            |
| 4,25                                                                                                                       | 30,2             |            |
| 17                                                                                                                         | 28,5             | 5,8        |
| 20,4                                                                                                                       | 27,8             | 5,6        |
| 52                                                                                                                         | 19,13            | 3,5        |
| 69                                                                                                                         | 16,0             | 2,9        |
| 75                                                                                                                         | 14,7             | 2,75       |
| 77                                                                                                                         | 14,42            | 3          |
| 86                                                                                                                         | 12,87            | 2,9        |
| 92                                                                                                                         | 11,75            | 2,59       |
| 103                                                                                                                        | 10,13            | 2,70       |
| 115                                                                                                                        | 8,78             | 2,78       |
| 127                                                                                                                        | 7,66             | 3,10       |
| 134                                                                                                                        | 7,0              | 3,30       |
| 146                                                                                                                        | 5,95             | 3,68       |
| 167                                                                                                                        | 4,5              | 4          |
| 178                                                                                                                        | 3,82             | 4,39       |
| 212                                                                                                                        | 2,27             | 5,13       |
| 224,5                                                                                                                      | 1,76             | 5,36       |
| 241                                                                                                                        | 1,18             | 5,58       |
| 260                                                                                                                        | 0,674            | 5,96       |
| 285                                                                                                                        | 0,175            | 6,48       |
| 312                                                                                                                        | 0,253            | 7,03       |
| 351                                                                                                                        | 0,606            | 7,37       |
| 394                                                                                                                        | 0,866            | 8,16       |
| 432                                                                                                                        | 0,964            | 8,58       |
| 490                                                                                                                        | 0,924            | 9,82       |
| 529                                                                                                                        | 0,71             | 9,74       |
| 558                                                                                                                        | 0,25             | 8,29       |
| 579                                                                                                                        | 0                | 9,56       |
| 597                                                                                                                        | 0                | 10,83      |
| 607                                                                                                                        | 0                | 11,1       |
| 626,5                                                                                                                      | 0                | 11,8       |
| 677                                                                                                                        | 0                | 12,35      |
| 750                                                                                                                        | 0                | 12,93      |

l'hélium liquide en a été rendue délicate ; nous avons observé qu'entre 8 000 et 20 000 Oe la variation de  $\sigma$  en fonction de  $1/H_i$  pouvait être représentée par une droite à 1 p. 100 près ; nous avons alors adopté pour  $\sigma_s$  la valeur de l'ordonnée à l'origine de la droite ( $\sigma, \frac{1}{H_i}$ ) extrapolée. Les erreurs maxima sur  $\sigma_s$  et  $\chi$  sont respectivement de 1 p. 100 et

4 p. 100. Sur la figure 2 sont représentées en fonction de la température (tableau I) suivant la courbe 4 la variation de  $\sigma_s$  et suivant la courbe 5 celle de  $1/\chi_m$ , la droite 6 est parallèle à la droite de Curie calculée pour les ions Gd contenus dans la molécule. Nous remarquons

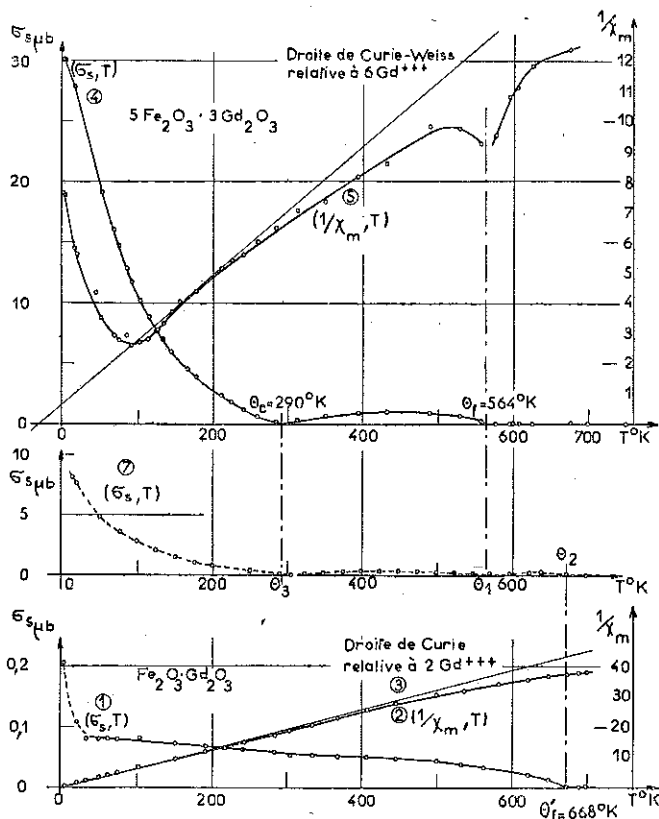


Fig. 2.

que l'aimantation spontanée décroît rapidement lorsque la température croît, s'annule à une température  $\theta_c$  de  $290^\circ \text{K}$ , réapparaît et s'annule définitivement au point de Curie ferromagnétique  $\theta_f$  égal à  $564^\circ \text{K}$ . Bien que l'on ne possède pas un grand nombre de points expérimentaux aux très basses températures, on peut montrer (fig. 3) que la variation de  $\sigma_s$  en fonction du carré de la température absolue peut être représentée par une droite à la précision de nos expériences; il en résulte que la tangente à  $(\sigma_s, T)$  au zéro absolu est horizontale. L'allure générale de cette courbe est semblable à celle du type N décrite antérieure-

ment par L. Néel (25) et observée expérimentalement par E. W. Gorter (18) sur les ferrites  $\text{Li}_{0,8}\text{Fe}_{2,2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$ .

L'inverse  $1/\chi_m$  de la susceptibilité décroît entre  $0^\circ$  et  $100^\circ \text{K}$ , puis croît avec une pente du même ordre de grandeur que celle de la droite calculée de Curie-Weiss; elle présente une discontinuité au point de Curie  $\theta_f$ .

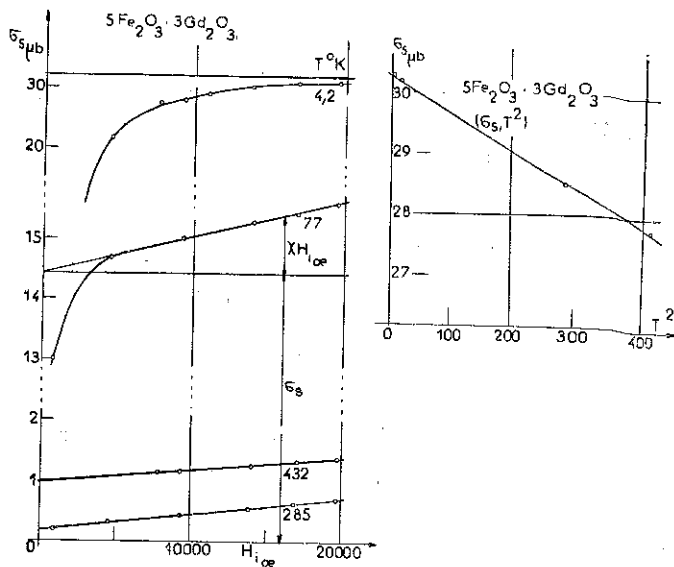


Fig. 3.

Sur la figure 2 nous avons représenté suivant la courbe 7, la variation  $(\sigma_s, T)$  relative à l'échantillon de ferrite de gadolinium de notre première étude (35), de composition globale  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Gd}_2\text{O}_3$ . On peut montrer que les propriétés de cet échantillon peuvent s'interpréter quantitativement à 2 p. 100 près en admettant qu'il est constitué par le mélange 0,26 g de  $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Gd}_2\text{O}_3$ , 0,64 g de  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Gd}_2\text{O}_3$  et 0,1 g de  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ . Les points de compensation  $\theta_c$  et les points de Curie  $\theta_1$  (34) appartiennent au ferrite  $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Gd}_2\text{O}_3$ ; les points de Curie  $\theta_2$  (34) appartiennent au ferrite  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Gd}_2\text{O}_3$ . Cette explication rend compte des divergences exposées au paragraphe 1.

V. — **Conclusions des études préliminaires.** — Il ressort de cette première partie qu'au cours de la préparation chimique le ferrite à structure grenat doit se former plus facilement que le ferrite à structure pérovskite. Les propriétés magnétiques relatives à chacun de ces deux types de ferrites sont très différentes. Il était alors intéressant d'étudier dans

II. — *Propriétés magnétiques des ferrites avec  $M = Y; Gd; Tb; Dy; Ho; Er; Tm; Yb; Lu$ . Résultats expérimentaux.* — À une température donnée, pour les ferrites avec Y et Lu, l'expérience montre que

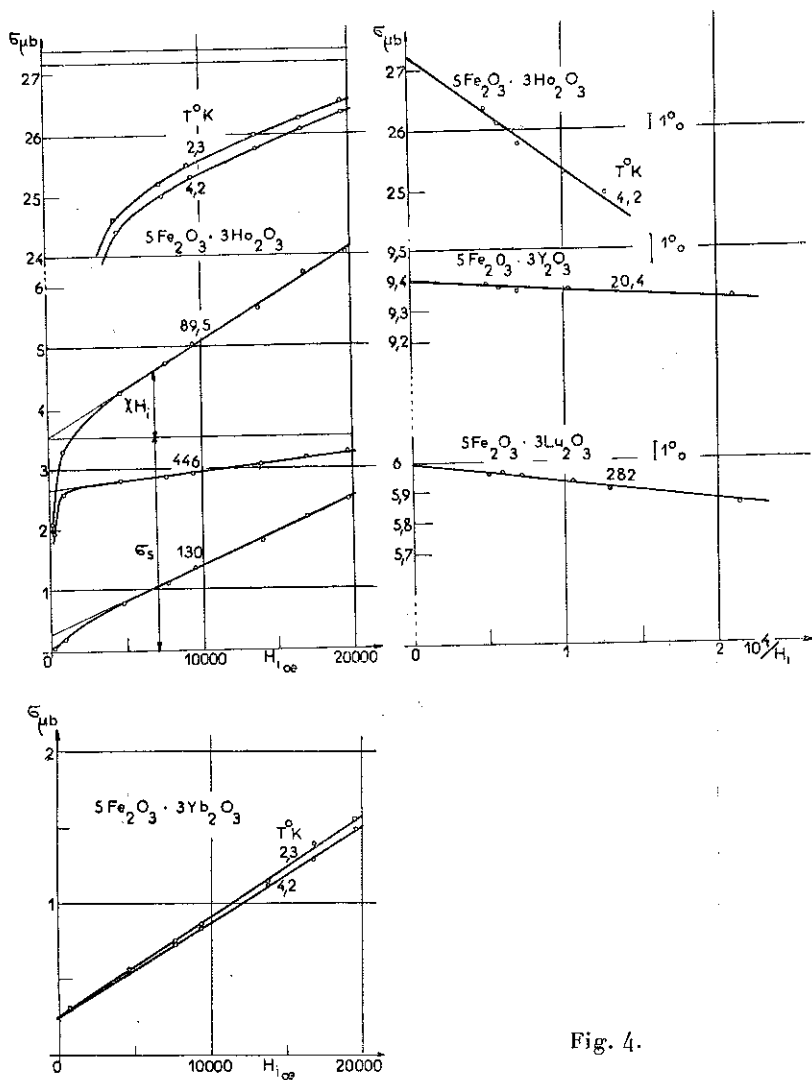


Fig. 4.

l'aimantation varie avec le champ intérieur  $H_i$  suivant la loi d'approche à la saturation :

$$(2) \quad \sigma = \sigma_s \left( 1 - \frac{a}{H_i} \right)$$

TABLEAU III

| M                     | Y               | Gd             | Tb             | Dy             | Ho             | Er             | Tm                    | Yb          | Lu              |
|-----------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|-------------|-----------------|
| $\theta_2$ °K $\pm 2$ |                 | 290            | 246            | 220            | 136            | 84             | $4 < \theta_2 < 20,4$ |             |                 |
| $\theta_f$ °K $\pm 2$ | 560             | 564            | 568            | 563            | 567            | 556            | 549                   | 548         | 549             |
| $\sigma_0$ pb         | $9,44 \pm 0,05$ | $30,3 \pm 0,3$ | $31,4 \pm 0,3$ | $32,5 \pm 0,3$ | $27,5 \pm 0,3$ | $23,1 \pm 0,3$ | $2,0 \pm 0,1$         | $0 \pm 0,3$ | $8,32 \pm 0,05$ |

TABLEAU IV

| $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Y}_2\text{O}_3$<br>$\theta_f = 560^\circ \text{ K}$ ; $\sigma_0 \mu_b = 9,44 \pm 0,05$ |                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| T° K                                                                                                                        | $\sigma_s \mu_b$ |
| 4,25                                                                                                                        | 9,26             |
| 15                                                                                                                          | 9,42             |
| 20,4                                                                                                                        | 9,41             |
| 30                                                                                                                          | 9,32             |
| 91,5                                                                                                                        | 9,22             |
| 117,5                                                                                                                       | 9,06             |
| 136                                                                                                                         | 8,92             |
| 148,5                                                                                                                       | 8,78             |
| 160                                                                                                                         | 8,66             |
| 173,5                                                                                                                       | 8,52             |
| 198                                                                                                                         | 8,20             |
| 226                                                                                                                         | 7,80             |
| 247                                                                                                                         | 7,53             |
| 260                                                                                                                         | 7,34             |
| 289                                                                                                                         | 6,91             |
| 318,5                                                                                                                       | 6,48             |
| 369                                                                                                                         | 5,76             |
| 417                                                                                                                         | 4,97             |
| 462                                                                                                                         | 4,23             |
| 500                                                                                                                         | 3,41             |
| 525                                                                                                                         | 2,78             |
| 544                                                                                                                         | 2,14             |
| 568                                                                                                                         | 0                |
| 605                                                                                                                         | 0                |

| $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Tb}_2\text{O}_3$<br>$\theta_c = 246^\circ \text{ K}$ ; $\theta_f = 568^\circ \text{ K}$<br>$\sigma_0 \mu_b = 31,4 \pm 0,3$ |                  |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------|
| T° K                                                                                                                                                            | $\sigma_s \mu_b$ | $1/\chi_m$ |
| 2,25                                                                                                                                                            | 31,38            |            |
| 4,25                                                                                                                                                            | 31,1             |            |
| 20,4                                                                                                                                                            | 26,29            | 0,99       |
| 40                                                                                                                                                              | 22,61            | 0,81       |
| 48                                                                                                                                                              | 20,38            | 0,80       |
| 69                                                                                                                                                              | 16,60            | 0,98       |
| 85                                                                                                                                                              | 12,69            | 1,29       |
| 92,5                                                                                                                                                            | 11,21            | 1,31       |
| 128                                                                                                                                                             | 6,52             | 1,98       |
| 154                                                                                                                                                             | 4,01             | 2,18       |
| 175                                                                                                                                                             | 2,72             | 2,53       |
| 208                                                                                                                                                             | 1,16             | 2,95       |
| 262                                                                                                                                                             | 0,34             | 3,79       |
| 285                                                                                                                                                             | 0,78             | 4,18       |
| 322,5                                                                                                                                                           | 1,16             | 4,59       |
| 387                                                                                                                                                             | 1,50             | 5,40       |
| 451                                                                                                                                                             | 1,52             | 6,38       |
| 513,5                                                                                                                                                           | 1,22             | 6,92       |
| 544                                                                                                                                                             | 0,884            | 6,64       |
| 562                                                                                                                                                             | 0,545            | 6,38       |
| 572                                                                                                                                                             | 0                |            |

(fig. 4). Le coefficient de dureté magnétique  $\alpha$  est inférieur à 150 sauf au voisinage du point de Curie. La valeur de l'aimantation spontanée  $\sigma_s$  s'obtient en extrapolant la droite  $(\sigma, 1/H_i)$  jusqu'à l'axe des ordonnées, l'erreur maximum est de 0,5 p. 100. Pour les ferrites avec Tb, Dy, Ho, Er, les isothermes  $(\sigma, H_i)$  (fig. 4, pour  $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Ho}_2\text{O}_3$  par ex.) sont analogues à celles que nous avons déjà décrites pour  $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Gd}_2\text{O}_3$  (§ 4-1<sup>re</sup> partie). les erreurs maxima sur les déterminations de  $\sigma_s$  et  $\chi$  sont également de 1 p. 100 et 4 p. 100. Pour les ferrites avec Tm et Yb, nous avons observé que les isothermes  $(\sigma, H_i)$  (fig. 4) obéissent à

TABLEAU IV (suite).

| $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Dy}_2\text{O}_3$<br>$\theta_c = 220^\circ \text{ K}$ ; $\theta_f = 563^\circ \text{ K}$<br>$\sigma_s \mu_b = 32,5 \pm 0,3$ |                  |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------|
| T° K                                                                                                                                                            | $\sigma_s \mu_b$ | $1/\chi_m$ |
| 2,12                                                                                                                                                            | 32,4             |            |
| 4,2                                                                                                                                                             | 31,8             |            |
| 14                                                                                                                                                              | 28,1             | 1,51       |
| 20,4                                                                                                                                                            | 26,3             | 1,22       |
| 30                                                                                                                                                              | 25,9             | 1,09       |
| 33                                                                                                                                                              | 25,0             | 1,04       |
| 48                                                                                                                                                              | 18,85            | 1,06       |
| 61,5                                                                                                                                                            | 16,26            | 1,18       |
| 74,5                                                                                                                                                            | 13,80            | 1,16       |
| 86                                                                                                                                                              | 11,67            | 1,20       |
| 103                                                                                                                                                             | 8,46             | 1,49       |
| 118                                                                                                                                                             | 6,66             | 1,69       |
| 128,5                                                                                                                                                           | 5,62             | 1,89       |
| 144,5                                                                                                                                                           | 4,19             | 2,01       |
| 158                                                                                                                                                             | 3,16             | 2,21       |
| 178                                                                                                                                                             | 1,88             | 2,46       |
| 206,5                                                                                                                                                           | 0,415            | 2,75       |
| 216                                                                                                                                                             | 0,343            | 2,82       |
| 222,5                                                                                                                                                           | 0,185            | 2,98       |
| 232,5                                                                                                                                                           | 0,334            | 3,18       |
| 246,5                                                                                                                                                           | 0,70             | 3,22       |
| 264                                                                                                                                                             | 1,09             | 3,46       |
| 285                                                                                                                                                             | 1,39             | 3,52       |
| 317,5                                                                                                                                                           | 1,69             | 3,92       |
| 351                                                                                                                                                             | 1,87             | 4,31       |
| 384                                                                                                                                                             | 1,92             | 4,70       |
| 426                                                                                                                                                             | 1,89             | 5,04       |
| 470,5                                                                                                                                                           | 1,71             | 5,55       |
| 517                                                                                                                                                             | 1,31             | 5,64       |
| 545,5                                                                                                                                                           | 0,68             | 4,31       |
| 564                                                                                                                                                             | 0                | 4,35       |
| 576                                                                                                                                                             | 0                | 5,58       |
| 595                                                                                                                                                             | 0                | 6,44       |
| 643                                                                                                                                                             | 0                | 7,2        |

| $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Ho}_2\text{O}_3$<br>$\theta_c = 136^\circ \text{ K}$ ; $\theta_f = 567^\circ \text{ K}$<br>$\sigma_s \mu_b = 27,5 \pm 0,3$ |                  |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------|
| T° K                                                                                                                                                            | $\sigma_s \mu_b$ | $1/\chi_m$ |
| 2,3                                                                                                                                                             | 27,44            |            |
| 4,2                                                                                                                                                             | 27,24            |            |
| 20,4                                                                                                                                                            | 21,55            | 1,17       |
| 47                                                                                                                                                              | 11,46            | 0,74       |
| 60                                                                                                                                                              | 8,97             | 0,80       |
| 89,5                                                                                                                                                            | 3,53             | 1,15       |
| 111                                                                                                                                                             | 1,49             | 1,39       |
| 130                                                                                                                                                             | 0,263            | 1,60       |
| 161                                                                                                                                                             | 1,023            | 1,84       |
| 191                                                                                                                                                             | 1,96             | 2,29       |
| 233                                                                                                                                                             | 2,80             | 2,81       |
| 259                                                                                                                                                             | 3,08             | 3,14       |
| 285                                                                                                                                                             | 3,02             | 3,57       |
| 329                                                                                                                                                             | 3,04             | 3,84       |
| 382                                                                                                                                                             | 2,96             | 4,64       |
| 446                                                                                                                                                             | 2,62             | 5,39       |
| 503                                                                                                                                                             | 2,10             | 6,02       |
| 546                                                                                                                                                             | 1,22             | 5,45       |
| 564                                                                                                                                                             | 0,55             | 4,50       |
| 570                                                                                                                                                             | 0                |            |
| 573                                                                                                                                                             | 0                |            |
| 579                                                                                                                                                             | 0                |            |

la loi 1,  $\sigma = \sigma_s + \chi H_i$ , même aux températures voisines de celles de l'hélium liquide.

Sur la figure 5, pour chaque ferrite, sont reportées en fonction de la

TABLEAU IV (suite)

| $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Er}_2\text{O}_3$<br>$\theta_c = 84^\circ \text{K}$ ; $\theta_f = 556^\circ \text{K}$<br>$\sigma_{0 \mu b} = 23,1 \pm 0,3$ |                  |              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------------|
| T° K                                                                                                                                                           | $\sigma_s \mu b$ | $1/\gamma_m$ |
| 4,2                                                                                                                                                            | 22,67            |              |
| 20,4                                                                                                                                                           | 12,84            | 0,85         |
| 56                                                                                                                                                             | 3,98             | 1,06         |
| 66,5                                                                                                                                                           | 2,01             | 1,08         |
| 72                                                                                                                                                             | 1,247            | 1,24         |
| 76                                                                                                                                                             | 0,773            | 1,30         |
| 82                                                                                                                                                             | 0,294            | 1,36         |
| 84                                                                                                                                                             | 0,216            | 1,39         |
| 87                                                                                                                                                             | 0,294            | 1,44         |
| 91                                                                                                                                                             | 0,63             | 1,51         |
| 98                                                                                                                                                             | 1,275            | 1,6          |
| 107                                                                                                                                                            | 1,88             | 1,73         |
| 131                                                                                                                                                            | 3,03             | 2,18         |
| 151                                                                                                                                                            | 3,52             | 2,29         |
| 175                                                                                                                                                            | 4,0              | 2,69         |
| 202                                                                                                                                                            | 4,28             | 2,93         |
| 234                                                                                                                                                            | 4,46             | 3,47         |
| 253                                                                                                                                                            | 4,48             | 3,78         |
| 283                                                                                                                                                            | 4,51             | 4,28         |
| 320,5                                                                                                                                                          | 4,20             | 4,44         |
| 361,5                                                                                                                                                          | 3,94             | 4,9          |
| 396                                                                                                                                                            | 3,67             | 5,14         |
| 439                                                                                                                                                            | 3,22             | 5,71         |
| 487                                                                                                                                                            | 2,57             | 6,19         |
| 523                                                                                                                                                            | 1,88             | 6,63         |
| 558                                                                                                                                                            | 0                | 4,23         |
| 615                                                                                                                                                            | 0                | 6,43         |
| 651                                                                                                                                                            | 0                | 7,61         |

| $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Tm}_2\text{O}_3$<br>$4 < \theta_c < 20,4$ ; $\theta_f = 549$<br>$\sigma_{0 \mu b} = 2,0 \pm 0,1$ |                  |              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------------|
| T° K                                                                                                                                  | $\sigma_s \mu b$ | $1/\gamma_m$ |
| 2,55                                                                                                                                  | 1,85             | 0,953        |
| 4,2                                                                                                                                   | 1,79             | 0,954        |
| 20,4                                                                                                                                  | 1,65             | 1,20         |
| 27                                                                                                                                    | 2,01             | 1,37         |
| 40                                                                                                                                    | 2,54             | 1,65         |
| 54,5                                                                                                                                  | 2,91             | 1,81         |
| 70                                                                                                                                    | 3,35             | 2,02         |
| 88                                                                                                                                    | 3,85             | 2,32         |
| 116                                                                                                                                   | 4,48             | 3,0          |
| 146                                                                                                                                   | 4,73             | 3,42         |
| 174                                                                                                                                   | 4,84             | 4,08         |
| 215                                                                                                                                   | 4,835            | 4,86         |
| 270                                                                                                                                   | 4,51             | 5,64         |
| 289                                                                                                                                   | 4,41             | 5,94         |
| 332                                                                                                                                   | 3,96             | 6,805        |
| 390,5                                                                                                                                 | 3,47             | 7,68         |
| 452                                                                                                                                   | 2,75             | 8,80         |
| 520                                                                                                                                   | 1,65             | 10           |
| 540                                                                                                                                   | 1,03             | 8,80         |
| 552                                                                                                                                   | 0                |              |
| 560                                                                                                                                   | 0                |              |
| 566                                                                                                                                   | 0                |              |

température les valeurs de  $\sigma_{s \mu b}$  (tableau IV). Les courbes  $(\sigma_s, T)$  relatives aux ferrites avec Tb, Dy, Ho, Er sont du type N, décrit ci-dessus à propos de  $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Gd}_2\text{O}_3$  (§ 4-1<sup>re</sup> partie) ; elles sont caractérisées par le fait que l'aimantation s'annule à une température de compensation  $\theta_c$  et que la tangente à la courbe au zéro absolu est horizontale. Dans le cas du ferrite de thulium, nous n'avons pu que localiser la température  $\theta_c$ .

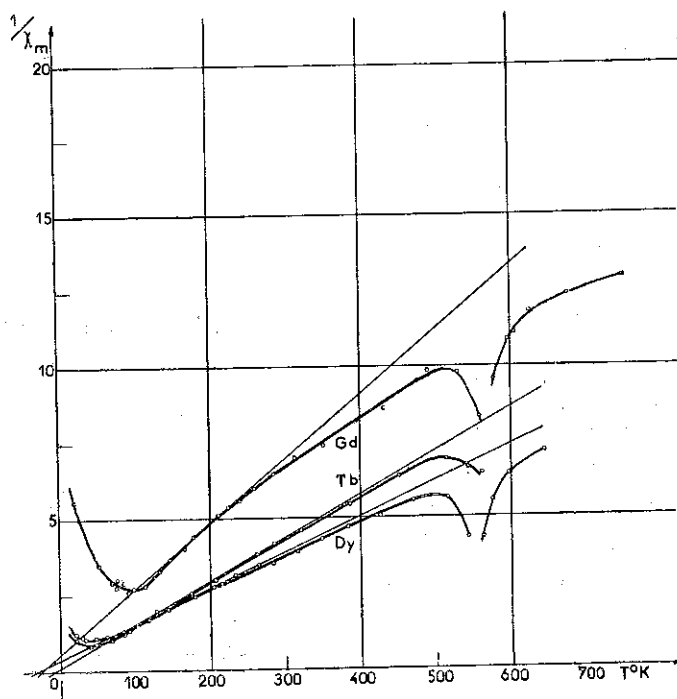
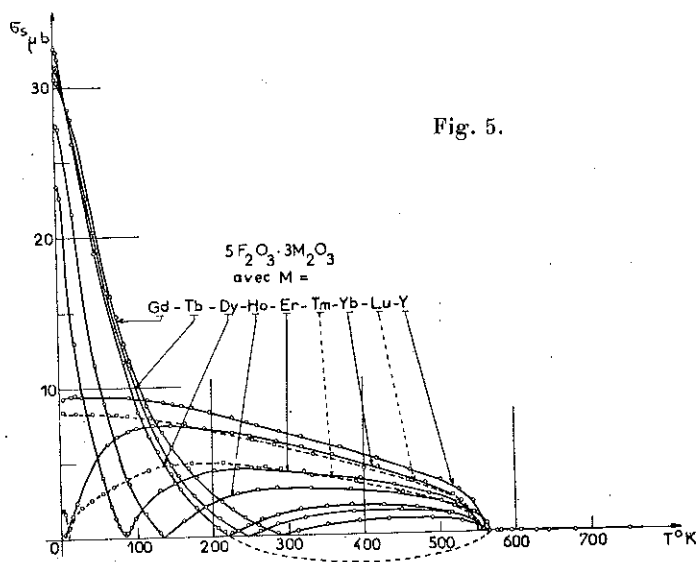
TABLEAU IV (suite)

| $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Yb}_2\text{O}_3$<br>$\theta_f = 548^\circ \text{K}; \sigma_{0\text{ub}} = 0 \pm 0,3$ |                  |            | $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Lu}_2\text{O}_3$<br>$\theta_f = 549; \sigma_{0\text{ub}} = 8,32 \pm 0,05$ |                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| T° K                                                                                                                      | $\sigma_s \mu_b$ | $1/\chi_m$ | T° K                                                                                                           | $\sigma_s \mu_b$ |
| 2,4                                                                                                                       | 0,252            | 2,70       | 4,2                                                                                                            | 8,32             |
| 4,2                                                                                                                       | 0,261            | 2,85       | 20,4                                                                                                           | 8,22             |
| 15                                                                                                                        | 1,458            | 4,21       | 44                                                                                                             | 8,20             |
| 20,4                                                                                                                      | 2,33             | 3,81       | 64,5                                                                                                           | 8,18             |
| 61,5                                                                                                                      | 6,26             | 8,0        | 74,5                                                                                                           | 8,175            |
| 75                                                                                                                        | 6,77             | 10,1       | 89,5                                                                                                           | 8,09             |
| 89,5                                                                                                                      | 7,05             | 10,41      | 118                                                                                                            | 7,88             |
| 100                                                                                                                       | 7,22             | 10,20      | 164                                                                                                            | 7,51             |
| 123                                                                                                                       | 7,40             | 12,62      | 192                                                                                                            | 7,15             |
| 145                                                                                                                       | 7,40             | 12,62      | 253                                                                                                            | 6,38             |
| 164                                                                                                                       | 7,36             | 15,06      | 282                                                                                                            | 6,0              |
| 190                                                                                                                       | 7,18             | 16         | 334                                                                                                            | 5,34             |
| 227,5                                                                                                                     | 6,84             | 17,42      | 400                                                                                                            | 4,46             |
| 250,5                                                                                                                     | 6,63             | 19,55      | 459                                                                                                            | 3,56             |
| 318                                                                                                                       | 5,81             | 10,2       | 529                                                                                                            | 2,04             |
| 359,5                                                                                                                     | 5,24             | 20,2       | 544                                                                                                            | 0,96             |
| 418                                                                                                                       | 4,47             | 20,6       | 555                                                                                                            | 0                |
| 481                                                                                                                       | 3,34             | 21,5       | 558                                                                                                            | 0                |
| 517                                                                                                                       | 2,43             | 15,3       | 581                                                                                                            | 0                |
| 548                                                                                                                       | 0                |            |                                                                                                                |                  |
| 592                                                                                                                       | 0                |            |                                                                                                                |                  |
| 620                                                                                                                       | 0                |            |                                                                                                                |                  |

entre  $4^\circ 2$  et  $20^\circ 4$  K. Pour le ferrite d'ytterbium, la courbe est du type P (25); l'aimantation spontanée croît avec la température, passe par un maximum pour ensuite décroître et s'annuler au point de Curie ferromagnétique  $\theta_c$ . Pour les ferrites avec Y et Lu, les courbes ( $\sigma_s$ , T) sont du type Q (25), elles ressemblent aux courbes observées sur une substance ferromagnétique normale.

Sur la figure 6 nous avons représenté les courbes de variation de l'inverse de la susceptibilité paramagnétique moléculaire  $\chi_m$  (tableau IV) en fonction de la température.

Dans le tableau III sont reportées pour chaque ferrite les valeurs de  $\theta_c$ ,  $\theta_f$  ainsi que l'aimantation à saturation absolue  $\sigma_{0\text{ub}}$ , obtenue par extrapolation au zéro absolu des courbes ( $\sigma_s$ ,  $T^2$ ) ou ( $\sigma_s$ , T).



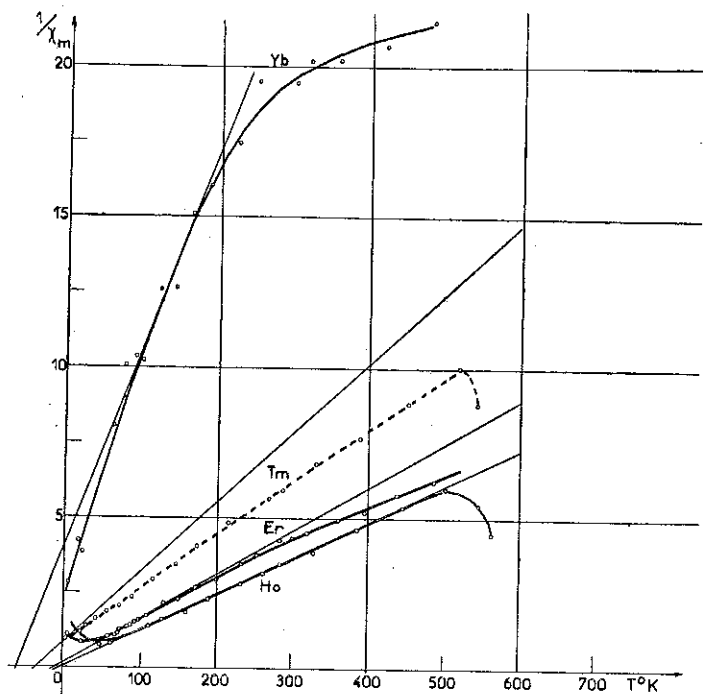


Fig. 6 bis.

## TROISIÈME PARTIE

Interprétation des propriétés magnétiques  
des ferrites  $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{M}_2\text{O}_3$ .

I. — *Résultats cristallographiques.* — F. Bertaut et F. Forrat ont montré que la structure cristalline de ces ferrites est du type grenat (fig. 7). Les ions oxygène définissent trois sortes de sites à l'intérieur desquels sont placés des ions magnétiques : les ions Fe occupent les sites octaédriques 16 *a* et tétraédriques 24 *d*, tandis que les ions M occupent les sites 24 *c*. Nous appellerons respectivement sous-réseau *a*, *d*, *c* l'ensemble des sites *a*, *d*, *c*. Les valeurs du paramètre *a* (7) (17) sont reportées dans le tableau II, elles varient dans l'ordre croissant des rayons ioniques de l'ion M.

II. — *Les interactions magnétiques.* — Considérons les ferrites d'yttrium et de gadolinium et faisons la somme des moments à saturation absolue des ions magnétiques contenus dans la molécule; nous trouvons respectivement les valeurs  $4 \times 5 + 6 \times 5 = 50 \mu\text{b}$  et  $6 \times 7 + 4 \times 5 + 6 \times 5 = 92 \mu\text{b}$ , alors que les valeurs expérimentales sont

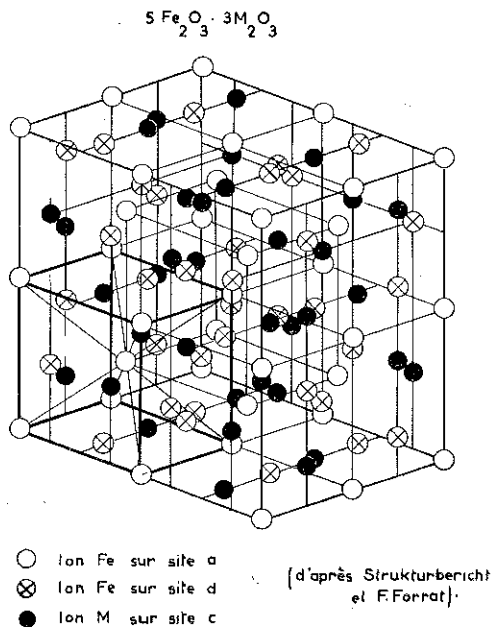


Fig. 7

Fig. 7.

9,44 et 30,3  $\mu\text{b}$ . Si on remarque également que la variation thermique de l'inverse de la susceptibilité paramagnétique au-dessus du point de Curie en fonction de la température est une courbe dont la concavité est dirigée du côté des  $T$  positifs (1) (2) (3) (4), on voit que ces résultats présentent une grande analogie avec ceux obtenus sur les ferrites spinelles (25). Pour les interpréter, L. Néel (26) a proposé le modèle ferrimagnétique suivant : entre les sous-réseaux  $a$  et  $d$  existent de fortes interactions négatives, qui orientent antiparallèlement les ions Fe des sites octaédriques d'une part aux ions Fe des sites tétraédriques d'autre part ; sous l'influence d'interactions négatives entre les sous-réseaux  $c$  et  $d$ , plus faibles que les précédentes, l'assemblage ferrimagnétique des ions Fe aimante les ions Gd des sites  $24c$  en sens inverse de sa propre aimantation résultante. Les valeurs des aimantations à satura-

tion absolue calculées, suivant ce schéma, pour les ferrites d'yttrium et de gadolinium sont alors  $6 \times 5 - 4 \times 5 = 10 \mu\text{b}$  et  $6 \times 7 + 4 \times 5 - 6 \times 5 = 32 \mu\text{b}$ , en bon accord avec les valeurs expérimentales. Le comportement ferrimagnétique des ions Fe a été confirmé par les expériences de diffraction des neutrons (8) sur le ferrite d'yttrium.

III. — *Les aimantations à saturation absolue.* — L'ion  $\text{Fe}^{+++}$  est dans un état S, son moment à saturation absolue est de  $5 \mu\text{b}$ . Pour calculer celui d'un ion trivalent de la série des terres rares nous utiliserons les

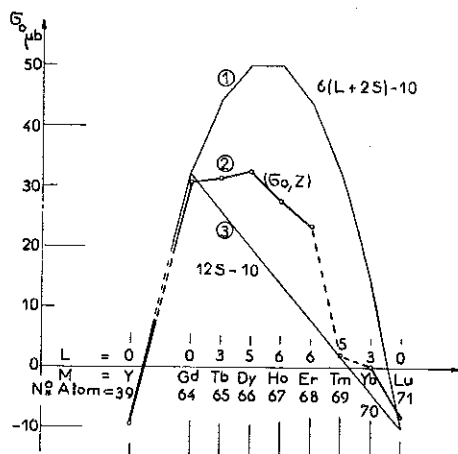


Fig. 8.

résultats théoriques de F. Hund (21) et J. H. Van Vleck (38). La couche électronique  $4f$  contribue au magnétisme, elle est complète avec 14 électrons (tableau V). Dans l'hypothèse du couplage de Russel-Saunders, les propriétés magnétiques de l'ion sont caractérisées par son nombre quantique de spin  $S$  et son nombre quantique orbital  $L$  (tableau V). Plus précisément, si les électrons  $4f$  sont placés dans un faible champ extérieur, l'état magnétique sera défini par le nombre quantique  $J = L + S$ , et le moment à saturation absolue de l'ion correspondant est égal à :

$$(3) \quad 1 \times L + 2 \times S$$

(tableau V); dans ces conditions, le moment à saturation absolue du ferrite  $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{M}_2\text{O}_3$ , calculé suivant le modèle proposé au paragraphe 2-3<sup>e</sup> partie est égal à :

$$(4) \quad \sigma_0 \mu\text{b} = |6(L + 2S) - 10|$$

(tableau V, courbe 1, fig. 8). Si nous admettons que la contribution

orbitale au moment magnétique est nulle, le moment à saturation absolue du ferrite est alors égal à :

$$(5) \quad \sigma_{\text{sb}} = |12S - 10|$$

(tableau V, courbe 2, fig. 8). Nous remarquerons que l'accord entre les valeurs expérimentales (tableau V, courbe 3, fig. 8) et calculées n'est satisfaisant que pour les ferrites avec Y, Gd, Lu, pour lesquels le nombre quantique orbital est zéro. Pour interpréter les écarts observés sur les autres ferrites avec l'une ou l'autre des valeurs calculées, l'hypothèse d'un modèle magnétique autre que celui décrit paragraphe 2-3<sup>e</sup> partie, par exemple un modèle triangulaire d'un type étudié par Y. Yafet et C. Kittel (40), nous paraît peu probable. Il semble plutôt que l'explication doit en être recherchée dans le fait qu'en raison d'un fort couplage spin-orbite le moment à saturation de l'ion terre-rare a une valeur comprise entre  $2S$  et  $L + 2S$ . Ce blocage du moment est possible si les électrons  $4f$  sont placés dans un fort champ cristallin dissymétrique (38) ; l'existence de ce dernier est vraisemblable ainsi qu'en témoigne la très grande anisotropie observée aux très basses températures sur les courbes  $(\sigma, H_i)$  (fig. 3 et 4).

**IV. — Interprétation qualitative des variations thermiques de l'aimantation spontanée et de l'inverse de la susceptibilité paramagnétique.** — Nous ferons l'hypothèse que les interactions magnétiques entre un ion M et ses voisins sont plus faibles que celle agissant sur un ion Fe. Il en résulte que lorsque la température croît, l'aimantation spontanée des ions M décroît plus rapidement que celles des ions Fe ; l'aimantation spontanée résultante, égale à la différence des deux aimantations spontanées ci-dessus, est dans le sens de celle d'un ion M aux basses températures, s'annule à une température de compensation  $\theta_c$ , puis change de sens au-dessus de  $\theta_c$ . On peut illustrer ce comportement en remarquant que la portion de courbe symétrique de  $(\sigma_s, T)$  par rapport à l'axe des abscisses au-dessus de  $\theta_c$ , est dans le prolongement de la courbe tracée au-dessous de  $\theta_c$  (fig. 5, pour  $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Dy}_2\text{O}_3$ , p. ex.). D'autre part, les mesures au galvanomètre balistique montrent que l'aimantation rémanente d'un échantillon de  $5 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Dy}_2\text{O}_3$ , porté dans un champ fort à la température de l'hydrogène liquide, décroît lorsque la température croît, s'annule au point de compensation  $\theta_c$  et change de sens au-dessus de  $\theta_c$ .

L'allure rectiligne des courbes  $(1/\chi_m, T)$  (fig. 6) nous indique qu'à des températures supérieures à  $100^\circ \text{K}$ , l'aimantation spontanée d'un ion M doit être inférieure à la moitié de la saturation absolue ; à cette condition, à une température donnée, la variation du moment de l'ion M en fonction du champ magnétique extérieur est du type paramagnétique. D'après l'allure des courbes  $(\sigma, 1/H_i)$  relatives aux ferrites d'yttrium et de lutétium (fig. 4), il est probable que dans les autres

TABLEAU V

| M                                                               | Y    | Gd   | Tb     | Dy    | Ho    | Er    | Tm    | Yb    | Lu   |
|-----------------------------------------------------------------|------|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Nombre d'électrons<br>4f                                        | 14   | 7    | 8      | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14   |
| L                                                               | 0    | 0    | 3      | 5     | 6     | 6     | 5     | 3     | 0    |
| S                                                               | 0    | 7/2  | 6/2    | 5/2   | 4/2   | 3/2   | 2/2   | 1/2   | 0    |
| $\sigma_0 \mu_B$<br>$= 6(L + 2S) - 10$                          | 10   | 32   | 44     | 50    | 50    | 44    | 32    | 14    | 10   |
| $\sigma_0 \mu_B$ exp.                                           | 9.44 | 30.3 | 31.4   | 32.5  | 27.5  | 23.1  | 2.0   | 0     | 8.32 |
| $\sigma_0 \mu_B = (12S - 10)$                                   | 10   | 32   | 26     | 20    | 14    | 8     | 2     | 4     | 10   |
| Constante de<br>Curie atomique<br>théorique avec<br>$J = L + S$ | 0    | 7.9  | 11.795 | 14.17 | 14.08 | 11.50 | 7.155 | 2.578 | 0    |

ferrites, l'aimantation des ions Fe varie peu avec  $H_i$ ; il en résulte que les interactions dues aux ions Fe sont approximativement constantes, en particulier celles agissant sur les ions M. Lorsque le ferrite est placé dans un champ extérieur variable, la variation d'aimantation observée dans les champs forts est donc uniquement la variation d'aimantation différentielle des ions M à partir de leur aimantation spontanée; la susceptibilité observée correspond à la tangente à la courbe de Brillouin, au point d'aimantation obtenu sous l'action du champ moléculaire des ions Fe.

Pour interpréter quantitativement les variations thermiques, nous étendrons aux substances à trois sous-réseaux magnétiques les méthodes de calcul, que nous avons déjà appliquées avec succès aux ferrites spinelles (37), utilisant l'approximation du champ moléculaire et développées par L. Néel (25) (27) (28) pour interpréter les propriétés magnétiques des substances à deux sous-réseaux d'ions magnétiques.

V. — *L'approximation du champ moléculaire.* — Les proportions d'ions magnétiques sur les sites  $a$ ,  $d$ ,  $c$ , sont respectivement :

$$\lambda = 1/4, \quad \mu = 3/8, \quad \nu = 3/8.$$

L'approximation du champ moléculaire revient à supposer que l'action des voisins sur un ion Fe placé sur un site  $a$  est équivalente à la somme  $\vec{h}_a$  de trois champs moléculaires  $\vec{h}_{aa}$ ,  $\vec{h}_{ad}$ ,  $\vec{h}_{ac}$ . Le premier  $\vec{h}_{aa}$ , résulte de l'action des voisins Fe placés sur les sites  $a$ , il est proportionnel au moment magnétique de ces ions  $\vec{J}_a$  et à leur nombre  $\lambda$ ; le champ  $\vec{h}_{ad}$  provient de l'action des voisins Fe placés sur les sites  $d$ , il est proportionnel à leur moment magnétique  $\vec{J}_d$  et à leur nombre  $\mu$ ;  $\vec{h}_{ac}$  serait défini de façon analogue.

D'une manière générale, les champs moléculaires  $\vec{h}_a$ ,  $\vec{h}_d$ ,  $\vec{h}_c$  s'écrivent :

$$(6) \quad \begin{cases} \vec{h}_a = n_{aa}\lambda\vec{J}_a + n_{ad}\epsilon_{ad}\mu\vec{J}_d + n_{ac}\epsilon_{ac}\nu\vec{J}_c. & (1) \\ \vec{h}_d = n_{da}\epsilon_{da}\lambda\vec{J}_a + n_{dd}\mu\vec{J}_d + n_{dc}\epsilon_{dc}\nu\vec{J}_c. & (2) \\ \vec{h}_c = n_{ca}\epsilon_{ca}\lambda\vec{J}_a + n_{cd}\epsilon_{cd}\mu\vec{J}_d + n_{cc}\nu\vec{J}_c. & (3) \end{cases}$$

Pour satisfaire au modèle magnétique du paragraphe 2-3<sup>e</sup> partie, nous imposerons les conditions suivantes :

$$\begin{aligned} n_{ad} &= n_{da}, \quad n_{dc} = n_{cd} \text{ positifs;} \\ n_{ac} &= n_{ca}, \quad n_{aa}, \quad n_{dd}, \quad n_{cc} \text{ négatifs;} \\ \epsilon_{ad} &= \epsilon_{da} = \epsilon_{cd} = \epsilon_{dc} = -1 \quad \text{et} \quad \epsilon_{ac} = \epsilon_{ca} = +1. \end{aligned}$$

A une température  $T$ , dans un champ magnétique extérieur  $H$  suffi-

samment élevé pour que les moments soient orientés parallèlement à sa direction, les aimantations partielles  $\mathcal{J}_a$ ,  $\mathcal{J}_d$ ,  $\mathcal{J}_c$  sont les solutions des trois équations simultanées :

$$(7) \quad \begin{cases} \mathcal{J}_a = M_a \cdot B_{ja} \left\{ \frac{M_a}{RT} (n_{ca}\lambda\mathcal{J}_a + n_{ad}\mu\mathcal{J}_d + n_{ac}\nu\mathcal{J}_c + \varepsilon H) \right\} & (1) \\ \mathcal{J}_d = M_d \cdot B_{jd} \left\{ \frac{M_d}{RT} (n_{da}\lambda\mathcal{J}_a + n_{dd}\mu\mathcal{J}_d + n_{dc}\nu\mathcal{J}_c - \varepsilon H) \right\} & (2) \\ \mathcal{J}_c = M_c \cdot B_{jc} \left\{ \frac{M_c}{RT} (n_{ca}\lambda\mathcal{J}_a + n_{cd}\mu\mathcal{J}_d + n_{cc}\nu\mathcal{J}_c + \varepsilon H) \right\} & (3) \end{cases}$$

Pour satisfaire au modèle ferrimagnétique  $\varepsilon$  sera pris égal à + 1 au-dessous de la température de compensation  $\theta_c$  et - 1 au-dessus de  $\theta_c$  ainsi que pour les ferrites d'yttrium, d'ytterbium et de lutétium.

$M_a$ ,  $M_d$ ,  $M_c$  sont respectivement les moments à saturation absolue d'un ion-gramme sur les sites  $a$ ,  $d$  ou  $c$ .

$B_{ja}(x)$  est la fonction de Brillouin <sup>(1)</sup> relative à un ion du sous-réseau  $a$ .

#### VI. — La susceptibilité paramagnétique au-dessous du point de Curie.

— Si pour les ferrites contenant Gd, Tb, Dy, Ho ou Er, on calcule les valeurs de l'aimantation spontanée  $\mathcal{J}_{cs}$  d'un ion M du sous-réseau  $c$ , à la température de 100° K, on remarque qu'elles correspondent à des valeurs de  $B_{jc}$  inférieures à 0,25 si l'on prend  $M_c = L + 2S$ , inférieures à 0,6 si l'on prend  $M_c = 2S$ .

Pour les températures supérieures à 100° K, on peut alors remplacer dans l'équation 3 du système 7,  $B_{jc}$  par le premier terme de son développement en série.

$$(8) \quad \mathcal{J}_c = \frac{C_c}{T} (n_{ca}\lambda\mathcal{J}_a + n_{cd}\mu\mathcal{J}_d + n_{cc}\nu\mathcal{J}_c + \varepsilon H)$$

avec :

$$C_c = \frac{J_c + 1}{3J_c} \cdot \frac{M_c^2}{R}.$$

Si l'on admet que la variation d'aimantation d'un ion Fe en fonction du champ est nulle (on vérifiera au paragraphe 8-3° partie qu'elle est très faible), le module de la susceptibilité paramagnétique  $\nu\chi_c$  des ions M, donné par :

$$(9) \quad \varepsilon\nu\chi_c = \frac{2\mathcal{J}_c}{\partial H}$$

obéit à la relation :

$$(10) \quad \nu\chi_c = \frac{\nu C_c}{T - \nu C_c \cdot n_{cc}}.$$

<sup>(1)</sup>  $B_J(z) = \frac{2J+1}{2J} \cdot \coth \frac{2J+1}{2J} \cdot z - \frac{1}{2J} \cdot \coth \frac{1}{2J} \cdot z$   $R = 8,314 \cdot 10^7$ .

C'est une droite de Curie-Weiss dont la pente est égale à la constante de Curie  $\nu C_c$  des ions M et dont le point de Curie paramagnétique  $\theta_p$  est donné par l'expression :

$$(11) \quad \theta_p = \nu C_c n_{cc}.$$

Nous avons représenté sur la figure 6 les droites de coefficient angulaire  $16 \nu C_c$ , calculé avec  $J = L + S$ . On remarque qu'à partir de températures  $\theta_c$ , inférieures à  $110^\circ \text{K}$  (tableau VI) la pente de la courbe expérimentale est du même ordre de grandeur que celle de la droite calculée. Les déterminations expérimentales de  $\theta_p$  sont difficiles (tableau VI), elles sont impossibles avec les ferrites de thulium et d'ytterbium. Bien que les valeurs de  $n_{cc}$  (tableau VI) déduites de  $\theta_p$ , ne soient pas connues

TABLEAU VI

| M                                | Gd   | Tb    | Dy   | Ho    | Er    | Tm                         | Yb |
|----------------------------------|------|-------|------|-------|-------|----------------------------|----|
| $\theta_b, ^\circ\text{K} \pm 5$ | 110  | 70    | 80   | 65    | 62    | ne peuvent être déterminés |    |
| $\theta_p, ^\circ\text{K} \pm 5$ | — 24 | — 8   | — 32 | — 6   | — 8   |                            |    |
| $n_{cc}$                         | — 8  | — 1,8 | — 6  | — 1,1 | — 1,8 |                            |    |
| $n$                              | 107  | 57,2  | 46,4 | 26,7  | 22,1  | $14,4 < n < 9$             |    |

avec précision, on retiendra pour le moment leurs faibles valeurs, significatives des faibles couplages magnétiques entre ions M ; une étude plus complète de ces interactions sera donnée au paragraphe 12-3<sup>e</sup> partie.

Pour expliquer les valeurs des saturations absolues prises par les ferrites, nous avons indiqué (§ 3-3<sup>e</sup> partie) que par suite d'un effet de blocage des moments par le champ cristallin, la saturation absolue de l'ion M devait être comprise entre  $2S$  et  $L + 2S$ . Nous venons d'établir qu'à des températures supérieures à  $\theta_b$ , ce moment est égal à  $L + 2S$ . Nous concluons que le blocage des moments se produit à des températures très basses, dans la région desquelles nous avons déjà fait remarquer que l'anisotropie magnétocristalline était très forte (§ 4-1<sup>re</sup> partie et 2-2<sup>e</sup> partie).

L'augmentation de  $(1/\chi_m, T)$  aux basses températures lorsque la température décroît (fig. 6) est liée à la saturation de l'ion M.

Le fait que la croissance de  $(1/\chi_m, T)$  aux hautes températures soit plus lente que celle de la droite de Curie-Weiss calculée par 10 pourrait s'expliquer par la superposition d'un paramagnétisme indépendant de la température-type paramagnétisme constant de Van Vleck (38); nous pensons (15) plutôt qu'il est dû au fait qu'à la susceptibilité  $\nu\chi_c$  s'ajoutent les susceptibilités des ions Fe,  $\lambda\chi_a$  et  $\mu\chi_d$ , que nous avons supposées nulles pour établir la relation 10. Les susceptibilités partielles  $\chi_a, \chi_d, \chi_c$ , sont les solutions du système :

$$(12) \quad \begin{cases} \varepsilon\chi_a = B'_{ja} \cdot \frac{M_a^2}{R} \frac{1}{T} (n_{aa}\lambda\varepsilon\chi_a + n_{ad}\mu\varepsilon\chi_d + n_{ac}\nu\varepsilon\chi_c + 1). & (1) \\ \varepsilon\chi_d = B'_{jd} \cdot \frac{M_d^2}{R} \frac{1}{T} (n_{da}\lambda\varepsilon\chi_a + n_{dd}\mu\varepsilon\chi_d + n_{dc}\nu\varepsilon\chi_c - 1). & (2) \\ \varepsilon\chi_c = \frac{C_c}{T} \cdot (n_{ca}\lambda\varepsilon\chi_a + n_{cd}\mu\varepsilon\chi_d + n_{cc}\nu\varepsilon\chi_c + 1). & (3) \end{cases}$$

$\varepsilon$  ayant la signification indiquée au paragraphe 5-3<sup>e</sup> partie. La susceptibilité relative à un ion-gramme de ferrite est :

$$(13) \quad \chi = \lambda\chi_a + \mu\chi_d + \nu\chi_c.$$

Nous donnerons des résultats relatifs à ce calcul au paragraphe 9-3<sup>e</sup> partie.

VII. — *La variation thermique de l'aimantation spontanée. Le cas de  $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Y}_2\text{O}_3$ .* — En l'absence de champ extérieur H, sous l'effet des seuls champs moléculaires  $\vec{h}_a, \vec{h}_d, \vec{h}_c$ , les ions magnétiques s'aimantent spontanément. Les valeurs correspondantes des aimantations spontanées partielles  $\vec{J}_{as}, \vec{J}_{ds}, \vec{J}_{cs}$  sont les solutions du système 7 dans lequel  $H = 0$ .

L'aimantation spontanée résultante est :

$$(14) \quad \vec{J}_s = \lambda \cdot \vec{J}_{as} + \mu \cdot \vec{J}_{ds} + \nu \cdot \vec{J}_{cs}.$$

Lorsque l'ion M n'est pas magnétique, c'est le cas des ferrites d'yttrium et de lutétium, les méthodes de calcul relatives aux substances à deux sous-réseaux (25) sont alors directement utilisables. Nous les avons appliquées au ferrite d'yttrium. L'expérience a montré (courbe 1, fig. 9) que la variation de l'inverse de la susceptibilité paramagnétique moléculaire au-dessus du point de Curie est hyperbolique et peut être représentée par une expression de la forme :

$$(15) \quad \frac{1}{\chi_m} = \frac{T}{C_M} + \frac{1}{\chi_0} - \frac{\sigma}{T - \theta}$$

en adoptant les valeurs  $C_M = 50$ ;  $1/\chi_0 = 30,5$ ;  $\sigma = 990$  et  $\theta = 570$  (2)

(courbe en trait fin, fig. 9). La valeur expérimentale de la constante de Curie moléculaire  $C^M$  est supérieure à la valeur théorique  $C'_M = 43,77$  relative aux dix ions  $Fe^{+++}$ . Un résultat semblable avait déjà été observé sur les ferrites spinelles (10). L. Néel (29) (30) l'a interprété par l'influence de la dilatation thermique sur les interactions magnétiques; en admettant une loi de variation linéaire du coefficient de champ moléculaire avec la température :

$$(16) \quad n_{ij} = n_{0ij}(1 + \gamma T)$$

on montre qu'entre  $C_M$  et  $C'_M$  on a la relation :

$$(17) \quad \frac{1}{C_M} = \frac{1}{C'_M} + \frac{\gamma}{\chi_0},$$

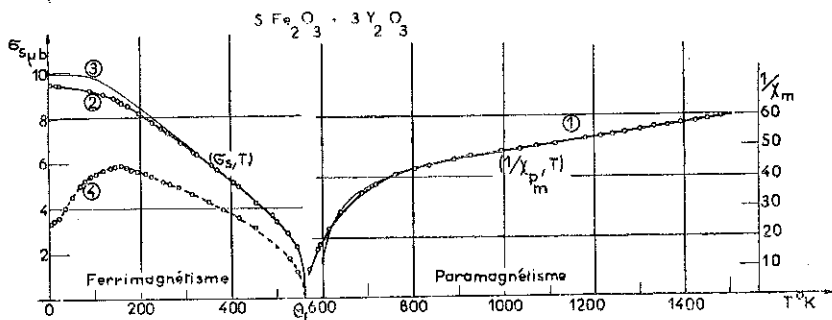


Fig. 9.

de laquelle on déduit  $\gamma = -1.10^{-4}$ . De  $\chi_0$ ,  $\sigma$ ,  $\theta$ , on peut déterminer  $n_{0aa} = -351,9$ ;  $n_{0ad} = 742$ ;  $n_{0dd} = -210,5$ .

Au moyen de ces valeurs numériques, nous avons calculé la variation thermique de l'aimantation spontanée (courbe 3, fig. 9) en appliquant les méthodes graphiques indiquées par L. Néel (25). La courbe calculée présente un accord satisfaisant avec la courbe expérimentale. Dans le tableau VII et figure 12 sont reportées en fonction de la température les valeurs calculées de  $\mathcal{J}_{as}$  et  $\mathcal{J}_{ds}$ . La courbe 4, figure 9 a été observée sur un échantillon préparé à partir d'oxyde d'yttrium contenant à l'état d'impuretés des terres rares fortement magnétiques comme Gd ou Dy; les atomes d'impuretés remplacent Y sur les sites c; leurs moments magnétiques s'orientent en sens inverse de l'aimantation générale; ainsi s'explique le déficit d'aimantation du ferrite impur, ainsi que la décroissance de  $\sigma_s$  quand la température diminue.

On conçoit que les calculs des courbes  $(\sigma_s, T)$  des ferrites à trois sous-réseaux soient plus complexes que ceux relatifs au ferrite d'yttrium;

nous en donnerons un exemple au paragraphe 9-3<sup>e</sup> partie, auparavant nous exposerons une méthode simplifiée qui rend suffisamment compte des faits physiques.

VIII. — *Le coefficient de champ moléculaire moyen entre l'ensemble des ions Fe et les ions M.* — On peut admettre en première approximation que les coefficients de champ moléculaire sont proportionnels aux points de Curie ferromagnétiques. La courbe  $(\theta_c, a)$  (fig. 10) indique que les points de Curie décroissent avec le paramètre (ce résultat sera

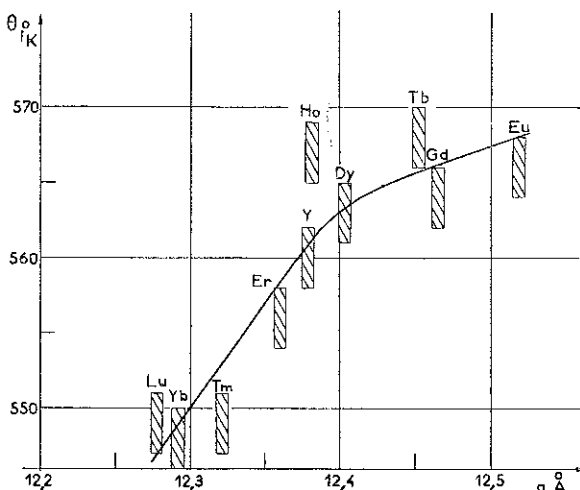


Fig. 10.

expliqué au paragraphe 12-3<sup>e</sup> partie) mais la variation correspondante des valeurs des coefficients de champ moléculaire ne doit pas dépasser 4 p. 100. Nous supposons donc dans la suite que les interactions entre les ions Fe restent constantes et que la courbe de variation thermique de l'aimantation spontanée résultante de ces ions reste sensiblement la même pour les différents ferrites et identique à celle du ferrite d'yttrium (fig. 9). Le coefficient de champ moléculaire moyen  $n$ , entre l'ensemble des ions Fe et les ions M, sera tel que son produit par l'aimantation résultante des ions Fe soit égal au champ moléculaire résultant créé par ces ions sur un ion M :

$$(18) \quad n(\mu J_{ds} - \lambda J_{as}) = n_{ca} \lambda J_a + n_{cd} \mu J_d.$$

A la température de compensation  $\theta_c$ , l'équation 3 du système 7, s'écrit alors :

$$(19) \quad J_{cs} = M_c \cdot B_{jc} \left\{ \frac{M_c}{R\theta_c} (n + n_{cc}) \nu J_{cs} \right\}$$

TABLEAU VII

| $\mathcal{H}_{as}$ (T) et $\mathcal{H}_{ds}$ (T)<br>en magnétons de Bohr<br>dans le ferrite d'yttrium<br>et les ferrites de terres rares |                                  |                                  | $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Gd}_2\text{O}_3$ |                    | $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Tb}_2\text{O}_3$ |                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------------------------------|--------------------|
| T° K                                                                                                                                     | $\mathcal{H}_{as}$ $\mu\text{b}$ | $\mathcal{H}_{ds}$ $\mu\text{b}$ | T° K                                                  | $\mathcal{H}_{cs}$ | T° K                                                  | $\mathcal{H}_{cs}$ |
| 0                                                                                                                                        | 5                                | 5                                | 20                                                    | 6,55               | 20                                                    | 6,83               |
| 109,5                                                                                                                                    | 5                                | 4,95                             | 50                                                    | 5,1                | 50                                                    | 5,02               |
| 137                                                                                                                                      | 4,99                             | 4,89                             | 100                                                   | 3,42               | 100                                                   | 3,31               |
| 156                                                                                                                                      | 4,97                             | 4,83                             | 150                                                   | 2,44               | 150                                                   | 2,29               |
| 180,5                                                                                                                                    | 4,89                             | 4,71                             | 200                                                   | 1,82               | 200                                                   | 1,83               |
| 209                                                                                                                                      | 4,87                             | 4,61                             | 250                                                   | 1,36               | 246                                                   | 1,31               |
| 227                                                                                                                                      | 4,86                             | 4,58                             | 290                                                   | 1,18               | 300                                                   | 1,41               |
| 240                                                                                                                                      | 4,83                             | 4,52                             | 350                                                   | 0,9                | 350                                                   | 0,81               |
| 263                                                                                                                                      | 4,77                             | 4,41                             | 400                                                   | 0,7                | 400                                                   | 0,64               |
| 281                                                                                                                                      | 4,72                             | 4,34                             | 450                                                   | 0,55               | 450                                                   | 0,47               |
| 306                                                                                                                                      | 4,62                             | 4,20                             | 500                                                   | 0,42               | 500                                                   | 0,23               |
| 325                                                                                                                                      | 4,60                             | 4,08                             |                                                       |                    |                                                       |                    |
| 355                                                                                                                                      | 4,37                             | 3,90                             |                                                       |                    |                                                       |                    |
| 377                                                                                                                                      | 4,24                             | 3,75                             |                                                       |                    |                                                       |                    |
| 403                                                                                                                                      | 4,06                             | 3,50                             |                                                       |                    |                                                       |                    |
| 430,5                                                                                                                                    | 3,85                             | 3,35                             |                                                       |                    |                                                       |                    |
| 453,5                                                                                                                                    | 3,61                             | 3,11                             |                                                       |                    |                                                       |                    |
| 488                                                                                                                                      | 3,22                             | 2,75                             |                                                       |                    |                                                       |                    |
| 527                                                                                                                                      | 2,75                             | 2,33                             |                                                       |                    |                                                       |                    |
| 538                                                                                                                                      | 2,42                             | 2,05                             |                                                       |                    |                                                       |                    |

TABLEAU VII (suite)

| $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Dy}_2\text{O}_3$ |                    | $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Ho}_2\text{O}_3$ |                    | $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Er}_2\text{O}_3$ |                    |
|-------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------------------------------|--------------------|
| T° K                                                  | $\mathcal{H}_{cs}$ | T° K                                                  | $\mathcal{H}_{cs}$ | T° K                                                  | $\mathcal{H}_{cs}$ |
| 20                                                    | 7,2                | 20                                                    | 6,2                | 20                                                    | 4,85               |
| 50                                                    | 4,95               | 50                                                    | 3,5                | 50                                                    | 2,40               |
| 100                                                   | 3,2                | 100                                                   | 2,05               | 84                                                    | 1,48               |
| 150                                                   | 2,2                | 136                                                   | 1,6                | 150                                                   | 0,86               |
| 220                                                   | 1,44               | 200                                                   | 1,2                | 200                                                   | 0,65               |
| 250                                                   | 1,2                | 250                                                   | 0,8                | 250                                                   | 0,56               |
| 300                                                   | 0,9                | 300                                                   | 0,72               | 300                                                   | 0,44               |
| 350                                                   | 0,68               | 350                                                   | 0,54               | 350                                                   | 0,36               |
| 400                                                   | 0,51               | 400                                                   | 0,40               | 400                                                   | 0,28               |
| 450                                                   | 0,38               | 450                                                   | 0,30               | 450                                                   | 0,22               |
| 500                                                   | 0,28               | 500                                                   | 0,25               | 500                                                   | 0,19               |

l'accord est satisfaisant entre les courbes  $(\sigma_s, T)$  et  $(1/\chi_m, T)$  expérimentales et calculées; on remarquera le brusque décrochage vers 40° K entre les deux courbes  $(\sigma_s, T)$ , probablement dû à l'effet de blocage des moments sous l'influence du champ cristallin.

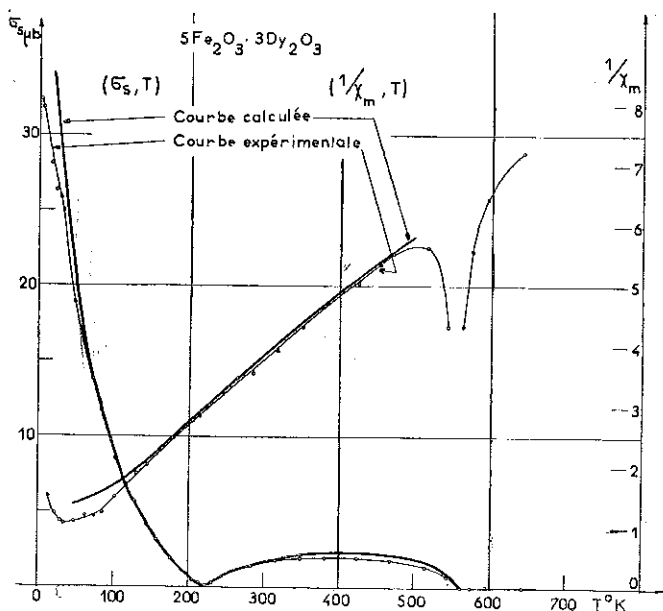


Fig. 13.

X. — *La variation thermique de l'inverse de la susceptibilité paramagnétique au-dessus du point de Curie.* — En notation matricielle, on peut écrire le système 6 d'équations linéaires reliant les champs moléculaires aux aimantations partielles sous la forme :

$$(22) \quad [\vec{h}] = [n] [\xi] [\vec{J}].$$

Si nous désignons par  $[C]$  la matrice colonne des constantes de Curie atomiques  $C_a, C_d, C_c$  des ions sur les sites  $a, d, c$  et par  $[\chi]$  le rapport  $[\vec{J}]/\vec{H}$ , on montre que dans la région paramagnétique  $[\chi]$  est relié à la température  $T$  par l'équation :

$$(23) \quad [\chi] = \{ T \cdot [1] - [C] \cdot [n] \cdot [\xi] \}^{-1} \cdot [C];$$

on remarquera l'analogie de cette expression en notation matricielle avec l'expression algébrique de la loi classique de Curie-Weiss. En résolvant l'équation 23 écrite pour trois sous-réseaux, on montre que

l'inverse de la susceptibilité atomique  $\chi = \lambda\chi_a + \mu\chi_d + \nu\chi_c$  varie avec la température suivant la loi :

$$(24) \quad \frac{1}{\chi} = \frac{T}{C} + \frac{1}{\chi_0} + \frac{\alpha T + \sigma}{T^2 + \beta T + \delta},$$

la constante de Curie  $C$  est égale à  $\lambda C_a + \mu C_d + \nu C_c$  et les coefficients  $1/\chi_0$ ,  $\alpha$ ,  $\sigma$ ,  $\beta$ ,  $\delta$  sont des fonctions des coefficients de champ moléculaire et de  $\lambda$ ,  $\mu$ ,  $\nu$ . D'une manière générale, on peut montrer que dans les substances à  $p$  sous-réseaux la courbe  $(1/\chi, T)$  est de degré  $p$ . Nous ne ferons pas la discussion de ces formes de courbes en fonction des différentes valeurs des paramètres, nous remarquons cependant qu'en raison de la prédominance des interactions entre ions Fe des sous-réseaux  $a$  et  $d$  (§ 9-3<sup>e</sup> partie), l'allure générale des courbes  $(1/\chi, T)$  doit peu différer de celle représentée par la loi hyperbolique relative au ferrimagnétisme à deux sous-réseaux (23) ; ce résultat a été vérifié par l'expérience (1).

## QUATRIÈME PARTIE

### Le cas des ferrites de samarium et d'euporium.

I. — *Propriétés magnétiques des ferrites avec  $M = \text{Sm}$  ; Eu. Résultats expérimentaux.* — Dans un grand intervalle de températures, les isothermes  $(\sigma, H_i)$  suivent la loi hyperbolique 2, avec un coefficient de dureté magnétique  $a$  inférieur à 150 sauf au voisinage du point de Curie et dans la région des très basses températures où apparaît une forte anisotropie magnétocristalline. Les courbes  $(\sigma_s, T)$  (fig. 14,

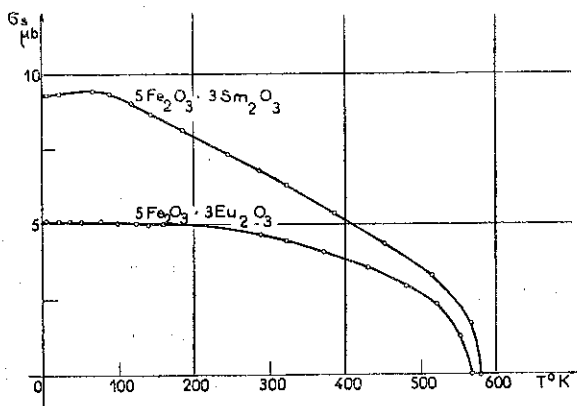


Fig. 14.

tableau VIII) ne présentent pas de points de compensation, on remarque cependant que pour le ferrite de samarium, aux basses températures, la courbe décroît légèrement avec la température.

TABLEAU VIII

| $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Sm}_2\text{O}_3$<br>$\theta_f = 578^\circ\text{K}$ ; $\sigma_0 \mu_b = 9,32$ |                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| T° K                                                                                                              | $\sigma_s \mu_b$ |
| 4,2                                                                                                               | 9,31             |
| 20,4                                                                                                              | 9,35             |
| 66,5                                                                                                              | 9,44             |
| 87                                                                                                                | 9,39             |
| 116                                                                                                               | 9,04             |
| 142                                                                                                               | 8,65             |
| 242                                                                                                               | 7,31             |
| 286                                                                                                               | 6,80             |
| 321                                                                                                               | 6,32             |
| 384                                                                                                               | 5,38             |
| 451                                                                                                               | 4,38             |
| 513                                                                                                               | 3,3              |
| 567                                                                                                               | 1,71             |
| 621                                                                                                               | 0                |

| $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Eu}_2\text{O}_3$<br>$\theta_f = 566^\circ\text{K}$ ; $\sigma_0 \mu_b = 5,15$ |                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| T° K                                                                                                              | $\sigma_s \mu_b$ |
| 4,2                                                                                                               | 5,18             |
| 20,4                                                                                                              | 5,11             |
| 35                                                                                                                | 5,16             |
| 50                                                                                                                | 5,16             |
| 75                                                                                                                | 5,16             |
| 98,5                                                                                                              | 5,09             |
| 120,5                                                                                                             | 5,03             |
| 138                                                                                                               | 5,03             |
| 159                                                                                                               | 5,02             |
| 286                                                                                                               | 4,68             |
| 320                                                                                                               | 4,44             |
| 371                                                                                                               | 4,10             |
| 428                                                                                                               | 3,56             |
| 478                                                                                                               | 2,96             |
| 520                                                                                                               | 2,36             |
| 592                                                                                                               | 0                |
| 640                                                                                                               | 0                |

L'interprétation de ces résultats est plus complexe que celle des résultats relatifs aux ferrites précédents ; au blocage des moments dans le champ cristallin dissymétrique (§ 3.3<sup>e</sup> partie) s'ajoute la propriété établie par J. H. Van Vleck (38) qu'en raison des faibles largeurs des intervalles des multiplets vis-à-vis de  $kT$ , le moment effectif de ces ions varie avec la température.

## CINQUIÈME PARTIE

### Les interactions.

**I. — Les coefficients réduits de champ moléculaire.** — L. Néel (31) (32) a établi que, dans les métaux de terres rares, le couplage des vecteurs magnétiques résultants  $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$  se fait uniquement par l'intermé-

diaire des vecteurs spins résultants  $S$ . En supposant qu'il en soit de même pour les ions de terres rares dans les ferrites correspondants, nous obtiendrons des résultats plus représentatifs en rapportant les coefficients de champ moléculaire au moment de spin seul des ions terres rares participant à la liaison magnétique; ceci nous conduit à remplacer les coefficients  $n$  et  $n_{cc}$  par des coefficients  $n'$  et  $n'_{cc}$  définis par les relations :

$$\begin{aligned} n' \cdot 2S &= n(L + 2S), \\ n'_{cc}(2S)^2 &= n_{cc}(L + 2S)^2. \end{aligned}$$

On a mis dans cette dernière relation  $(2S)^2$  et  $(L + 2S)^2$  car il s'agit d'interactions entre deux ions de terres rares.

Les variations de  $n'$  et  $n'_{cc}$  dans la série des terres rares ne devraient alors provenir que d'éventuelles variations de la distance entre les ions. Le tableau IX donne les valeurs de  $n'$  et  $n'_{cc}$ .

Si nous écrivons le système 6 des équations de champ moléculaire sous la forme :

$$(27) \quad \begin{cases} \vec{h}_a = p_{aa} \cdot u_{aa} \cdot \vec{J}_a + p_{ad} \cdot u_{ad} \cdot \vec{J}_d + p_{ac} \cdot u_{ac} \cdot \vec{J}_c \\ \vec{h}_d = p_{da} \cdot u_{da} \cdot \vec{J}_a + p_{dd} \cdot u_{dd} \cdot \vec{J}_d + p_{dc} \cdot u_{dc} \cdot \vec{J}_c \\ \vec{h}_c = p_{ca} \cdot u_{ca} \cdot \vec{J}_a + p_{cd} \cdot u_{cd} \cdot \vec{J}_d + p_{cc} \cdot u_{cc} \cdot \vec{J}_c \end{cases}$$

dans lesquelles  $p_{ij}$  représente le nombre d'ions sur des sites  $j$  proches voisins d'un ion sur un site  $i$  et à la distance  $D_{ij}$ , L. Néel (25) (33) a montré que le coefficient réduit de champ moléculaire  $u_{ij}$  est proportionnel à l'intégrale d'échange  $A_{ij}$  (38) entre deux porteurs de spin résultant  $S_i$  et  $S_j$ . En identifiant les équations des systèmes 6 et 27 et en utilisant les valeurs de  $p_{ij}$  (5) reportées dans le tableau X, on obtient :

$$\begin{aligned} u_{aa} &= \frac{n_{aa}}{32}; & u_{ad} &= -\frac{n_{ad}}{16}; & u_{ac} &= \frac{3}{32} \cdot n_{ad}; \\ u_{cc} &= \frac{3}{32} \cdot n_c; & u_{(ad)c} &= -\frac{n}{9,6}. \end{aligned}$$

TABLEAU IX

| M                                                     | Gd  | Tb   | Dy   | Ho   | Er   | Tm                 |
|-------------------------------------------------------|-----|------|------|------|------|--------------------|
| $n' = n \frac{L + 2S}{2S}$                            | 107 | 85,8 | 92,8 | 66,7 | 66,3 | $50,4 < n' < 66,5$ |
| $n'_{cc} = n_{cc} \left( \frac{L + 2S}{2S} \right)^2$ | 8   | 4    | 24   | 6,9  | 16   |                    |

Dans le tableau XI sont rassemblées les valeurs calculées de  $u_{ij}$  pour les différents ferrites étudiés ainsi que les distances entre couches magnétiques correspondantes, obtenues en faisant la différence entre la distance atomique  $D_{ij}$  (tableaux X et XI) et les diamètres ioniques  $\delta$  (valeurs de Goldschmidt).

Sur la figure 15 nous avons reporté les valeurs de  $u$  en fonction de  $D-\delta$  pour les ferrites de terres rares ainsi que celles relatives à la

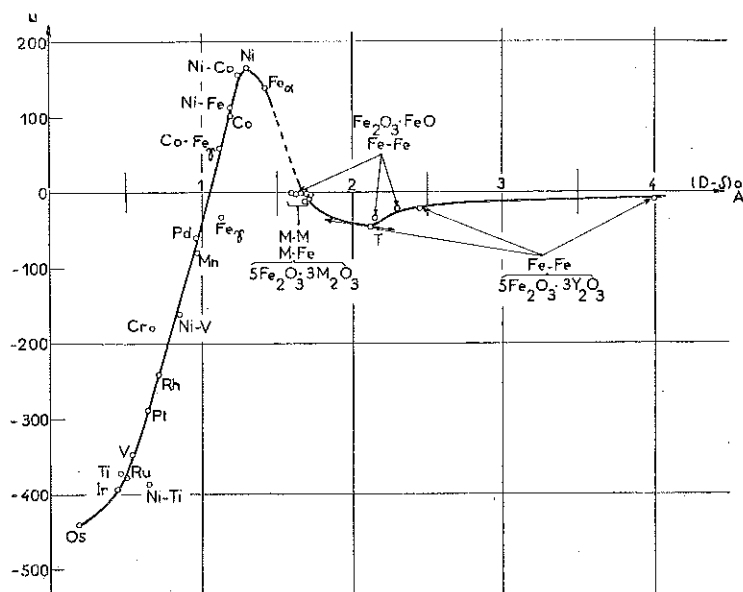


Fig. 15.

magnétite (29) (tableau XI). Nous remarquons que les différents points peuvent être reliés entre eux par une courbe continue, qui elle-même peut être reliée de façon continue à la courbe  $(u, D-\delta)$  calculée par L. Néel (33) sur les métaux et alliages. Est-ce une coïncidence? En effet, l'entourage des ions magnétiques dans les ferrites n'est pas constitué uniquement d'ions magnétiques, comme cela est le cas dans les métaux, mais également d'ions d'oxygène par l'intermédiaire desquels peuvent exister des interactions indirectes de superéchange (22). Sans exclure l'hypothèse du superéchange, la continuité des deux courbes signifie que s'il y a superéchange, l'amplitude des interactions indirectes correspondantes varie de façon continue avec la distance entre couches magnétiques. L. Néel nous a fait remarquer que la portion de courbe correspondant à des valeurs de  $D-\delta$  supérieures à  $1,5 \text{ \AA}$

TABLEAU X

| Site <i>a</i> |   |            |                       | Site <i>d</i> |   |            |                       | Site <i>c</i> |   |            |                       |
|---------------|---|------------|-----------------------|---------------|---|------------|-----------------------|---------------|---|------------|-----------------------|
| <i>paa</i>    | 8 | <i>Daa</i> | $\frac{a\sqrt{3}}{4}$ | <i>pda</i>    | 4 | <i>Dda</i> | $\frac{a\sqrt{5}}{8}$ | <i>pcd</i>    | 4 | <i>Dcd</i> | $\frac{a\sqrt{5}}{8}$ |
| <i>pad</i>    | 6 | <i>Dad</i> | $\frac{a\sqrt{5}}{8}$ | <i>pdd</i>    | 4 | <i>Ddd</i> | $\frac{a\sqrt{6}}{8}$ | <i>pcd</i>    | 2 | <i>Dcd</i> | $\frac{a}{4}$         |
| <i>pac</i>    | 6 | <i>Dac</i> | $\frac{a\sqrt{5}}{8}$ | <i>pdc</i>    | 4 | <i>Ddc</i> | $\frac{a}{4}$         | <i>pcc</i>    | 4 | <i>Dcc</i> | $\frac{a\sqrt{6}}{8}$ |

TABLEAU XI

|                                                                            | <i>u<sub>ij</sub></i> |            | <i>D<sub>ij</sub></i> Å | $\delta$ Å | <i>D<sub>ij</sub></i> — $\delta$ Å |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------|-------------------------|------------|------------------------------------|
| 5Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 3Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . .     | <i>uaa</i>            | — 11 (1)   | 5,35                    | 1,34       | 4,01                               |
|                                                                            | <i>uad</i>            | — 46,4     | 3,46                    | 1,34       | 2,12                               |
|                                                                            | <i>uid</i>            | — 20       | 3,79                    | 1,34       | 2,45                               |
| 5Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 3Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . .    | <i>ucc</i>            | — 0,75     | 3,818                   | 2,22       | 1,598                              |
|                                                                            | <i>u(ad)c</i>         | — 11,75    | 3,46 (1)                | 1,78 (1)   | 1,68 (1)                           |
| 5Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 3Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . .    | <i>ucc</i>            | — 0,25     | 3,817                   | 2,18       | 1,637                              |
|                                                                            | <i>u(ad)c</i>         | — 6,3      | 3,46 (1)                | 1,76 (1)   | 1,70 (1)                           |
| 5Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 3Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . .    | <i>ucc</i>            | — 1,1      | 3,80                    | 2,14       | 1,66                               |
|                                                                            | <i>u(ad)c</i>         | — 10,2 (1) | 3,444 (1)               | 1,74 (1)   | 1,704 (1)                          |
| 5Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 3Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . .    | <i>ucc</i>            | — 0,3      | 3,789                   | 2,1        | 1,689                              |
|                                                                            | <i>u(ad)c</i>         | — 7,35 (1) | 3,44 (1)                | 1,72 (1)   | 1,72 (1)                           |
| 5Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 3Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . .    | <i>ucc</i>            | — 0,5      | 3,782                   | 2,08       | 1,702                              |
|                                                                            | <i>u(ad)c</i>         | — 7,3 (1)  | 3,429 (1)               | 1,71 (1)   | 1,719 (1)                          |
| 5Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 3Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . .    | <i>u(ad)c</i>         | — 6,6 (1)  | 3,426 (1)               | 1,71 (1)   | 1,726 (1)                          |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (16) . . . | <i>uaa</i>            | — 20,6     | 3,64                    | 1,34       | 2,30                               |
|                                                                            | <i>uab</i>            | — 32,4     | 3,49                    | 1,34       | 2,15                               |
|                                                                            | <i>ubb</i>            | + 1,5      | 2,97                    | 1,34       | 1,63                               |
| (1) Valeurs moyennes.                                                      |                       |            |                         |            |                                    |

environ peut être considérée comme étant la résultante de deux courbes : la première, représentant les interactions d'échange, correspond à des valeurs positives de  $u$  ; elle décroît régulièrement quand  $D-\delta$  croît ; la seconde, représentant les interactions de superéchange, correspond à des valeurs négatives de  $u$  ; pour  $1,5 \text{ \AA}$  environ la valeur de  $u$  est nulle, elle décroît, passe par un minimum pour  $2,1 \text{ \AA}$  environ et tend vers 0 quand  $D-\delta$  croît.

L'allure de la courbe ( $u, D-\delta$ ) rend compte du résultat signalé au paragraphe 8-3<sup>e</sup> partie relatif à la décroissance du point de Curie ferromagnétique avec le paramètre  $a$  ; en effet, pour les ferrites considérés, les distances entre couches magnétiques  $a-d$  sont de l'ordre de  $2,12 \text{ \AA}$ , les coefficients de champ moléculaire réduit  $u_{ad}$ , définissant les points de Curie, décroissent en module lorsque  $D-\delta$  (ou le paramètre  $a$ ) décroît. A partir des valeurs  $\theta_f$  (tableau III) et de la valeur  $u_{ad}$  connue pour le ferrite d'yttrium (tableau XI), on peut calculer les valeurs de  $u_{ad}$  pour les autres ferrites, en admettant qu'elles sont proportionnelles à  $\theta_f$  ; le tracé sur un graphique à grande échelle de ces valeurs en fonction de  $D-\delta$  nous a permis de tracer la tangente T à la courbe au point  $D-\delta = 2,1 \text{ \AA}$ .

Cette courbe rend également compte des variations observées sur les valeurs de  $n$  ; en effet, en raison des faibles variations du paramètre des différents ferrites, on aurait pu s'attendre, en accord avec des résultats antérieurs de L. Néel (31) à ce que les valeurs de  $n'$  soient constantes. Les variations observées peuvent résulter du fait que sur la courbe ( $u, D-\delta$ ), les points correspondants à  $n'$  sont situés au voisinage de  $1,65 \text{ \AA}$ , où la pente de la courbe est la plus grande.

Nous retiendrons de cette courbe que les substances ont un comportement antiferromagnétique lorsque les distances entre couches magnétiques sont inférieures à  $1,1 \text{ \AA}$  ; le ferromagnétisme est limité aux distances comprises entre  $1,1$  et  $1,7 \text{ \AA}$ , au-delà de cette dernière valeur se manifeste le ferrimagnétisme.

**Conclusion.** — Ainsi, nous avons montré que les propriétés magnétiques des ferrites de terres rares s'interprètent dans le sens des idées développées par L. Néel (25) sur le ferrimagnétisme. Nous avons précisé les intensités des interactions entre ions magnétiques et montré qu'elles sont du même ordre de grandeur que celles agissant dans les ferrites spinelles (25) ; nous avons ainsi obtenu quelques indications sur la variation des interactions en fonction de la distance entre les couches magnétiques. Enfin, notre étude apporte des données expérimentales nouvelles sur le blocage des moments magnétiques dans un champ cristallin dissymétrique.

*Travail exécuté au Laboratoire d'Electrostatique  
et de Physique du Métal  
de la Faculté des Sciences de Grenoble.*

## BIBLIOGRAPHIE

- (1) R. ALÉONARD. — Communication personnelle.
- (2) R. ALÉONARD, J. C. BARBIER et R. PAUTHENET. — *C. R. Acad. Sci.*, 1956, **242**, 2531-2533.
- (3) J. C. BARBIER et R. ALÉONARD. — *C. R. Acad. Sci.*, 1956, **242**, 83-85.
- (4) R. BENOIT. — *C. R. Acad. Sci.*, 1955, **240**, 2389-2390.
- (5) F. BERTAUT et F. FORRAT. — *C. R. Acad. Sci.*, 1956, **242**, 382-384.
- (6) F. BERTAUT et F. FORRAT. — *J. Phys. Radium*, 1956, **17**, 129-131.
- (7) F. BERTAUT. — *The convention on ferrites*, London, 1956; *Proc. Inst. electr. Engrs*, Part B, Suppl. n° 5 (à paraître).
- (8) F. BERTAUT, F. FORRAT, A. HERPIN et P. MERIEL. — *C. R. Acad. Sci.*, 1956, **243**, 898-901.
- (9) R. P. BOZORTH, M. J. WILLIAMS, DOROTHY et E. WALSH. — *Phys. Rev.*, U. S. A., 1956, **103**, 572.
- (10) M. FALLOT et P. MARONI. — *J. Phys. Radium*, 1951, **12**, 256-257.
- (11) H. FORESTIER et G. GUIOT-GUILLAIN. — *C. R. Acad. Sci.*, 1950, **230**, 1844-1845.
- (12) H. FORESTIER et G. GUIOT-GUILLAIN. — *C. R. Acad. Sci.*, 1952, **235**, 48.
- (13) H. FORESTIER et G. GUIOT-GUILLAIN. — *C. R. Acad. Sci.*, 1953, **237**, 1654-1656.
- (14) S. GELLER. — *Phys. Rev.*, U. S. A., 1955, **99**, 1641.
- (15) S. GELLER. — *J. chem. Phys.*, U. S. A., 1956, **24**, 1236-1239.
- (16) M. A. GILLES. — *Phys. Rev.*, U. S. A., 1955, **99**, 1641.
- (17) M. A. GILLES. — *J. chem. Phys.*, U. S. A., 1956, **24**, 1239-1243.
- (18) E. W. GORTER. — *Thèse Univ. Leyde*, 1954; *Philips Res. Rep.*, Netherl., 1954, **9**, 295-365, 403-443.
- (19) G. GUIOT-GUILLAIN, R. PAUTHENET et H. FORESTIER. — *C. R. Acad. Sci.*, 1954, **239**, 155-157.
- (20) G. GUIOT-GUILLAIN. — *C. R. Acad. Sci.*, 1951, **232**, 1832-1833.
- (21) F. HUND. — *Z. Phys.*, Dtsch., 1925, **33**, 855-859.
- (22) H. A. KRAMERS. — *Physica*, Pays-Bas, 1934, **1**, 182-192.
- (23) L. NEEL. — *C. R. Acad. Sci.*, 1954, **239**, 8-11.
- (24) L. NEEL et R. PAUTHENET. — *C. R. Acad. Sci.*, 1952, **234**, 2172-2174.
- (25) L. NEEL. — *Ann. Phys.*, Fr., 1948, **3**, 137-198.
- (26) L. NEEL. — *C. R. Acad. Sci.*, 1954, **239**, 8-11.
- (27) L. NEEL. — *Ann. Phys.*, Fr., 1932, **18**, 5-105.
- (28) L. NEEL. — *C. R. Acad. Sci.*, 1934, **198**, 1311-1313.
- (29) L. NEEL. — *Ann. Inst. Fourier*, 1949, **1**, 163-183.
- (30) L. NEEL. — *J. Phys. Radium*, 1951, **12**, 259.
- (31) L. NEEL. — *C. R. Acad. Sci.*, 1938, **206**, 49-51.
- (32) L. NEEL. — *Z. Elektrochem.*, Dtsch., 1939, **45**, 378-379.
- (33) L. NEEL. — *Ann. Phys.*, Fr., 1936, **5**, 232-279.
- (34) R. PAUTHENET. — *Ann. Phys.*, Fr., 1952, **7**, 710-747.
- (35) R. PAUTHENET et P. BLUM. — *C. R. Acad. Sci.*, 1954, **239**, 33-35.
- (36) R. PAUTHENET. — *C. R. Acad. Sci.*, 1956, **242**, 1859-1862.
- (37) J. H. VAN VLECK. — *The theory of electric and magnetic susceptibilities*. Oxford, University Press, 1932, 24,5 × 17, xi-384 p.
- (38) P. WEISS. — *Arch. Sci. phys. nat.*, Suisse, 1910, **29**, 175.
- (39) Y. YAFET et C. KITTEL. — *Phys. Rev.*, U. S. A., 1952, **87**, 290-294.

# TABLE DES MATIÈRES

|                                                                                                                                                             | Pages |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| PRÉAMBULE. . . . .                                                                                                                                          | 2     |
| <i>Les propriétés magnétiques des ferrites d'yttrium<br/>et de terres rares de formule <math>5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{M}_2\text{O}_3</math>.</i> |       |
| HISTORIQUE . . . . .                                                                                                                                        | 2     |
| Propriétés magnétiques du ferrite $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Gd}_2\text{O}_3$ à structure<br>pérovskite . . . . .                                   | 4     |
| Propriétés magnétiques du ferrite $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Gd}_2\text{O}_3$ à structure<br>grenat . . . . .                                     | 4     |
| Conclusion préliminaire . . . . .                                                                                                                           | 7     |
| Les propriétés magnétiques des ferrites $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{M}_2\text{O}_3$ . . . .                                                        | 8     |
| Résultats expérimentaux . . . . .                                                                                                                           | 10    |
| Interprétation des propriétés magnétiques des ferrites $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot$<br>$3\text{M}_2\text{O}_3$ . . . . .                                  | 17    |
| Les interactions magnétiques . . . . .                                                                                                                      | 18    |
| Les aimantations à saturation absolue . . . . .                                                                                                             | 19    |
| Variations thermiques de l'aimantation spontanée et de l'inverse<br>de la susceptibilité paramagnétique . . . . .                                           | 20    |
| L'approximation du champ moléculaire . . . . .                                                                                                              | 22    |
| Le cas de $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Y}_2\text{O}_3$ . . . . .                                                                                    | 25    |
| La variation thermique de l'aimantation spontanée des ferrites<br>de terres rares . . . . .                                                                 | 28    |
| La variation thermique de l'inverse de la susceptibilité para-<br>magnétique au-dessus du point de Curie . . . . .                                          | 31    |
| Le cas des ferrites de samarium et d'euporium . . . . .                                                                                                     | 32    |
| Sur les interactions . . . . .                                                                                                                              | 33    |
| CONCLUSION. . . . .                                                                                                                                         | 37    |

# DEUXIÈME THÈSE

---

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

**Les applications des ferrites.**

Vu :

Grenoble, le 3 janvier 1957.

*Le Président de la Thèse,*

L. NÉEL.

Vu :

Grenoble, le 3 janvier 1957.

*Le Doyen de la Faculté des Sciences,*

L. MORET.

Vu ET PERMIS D'IMPRIMER :

*Le Recteur de l'Académie de Grenoble,*

C. COLLIARD.

T.R.

