



HAL
open science

Sur une loi de répartition discontinue des points de Curie ferromagnétiques - I. Le rôle de la distance entre les atomes magnétiques

Robert Forrer

► **To cite this version:**

Robert Forrer. Sur une loi de répartition discontinue des points de Curie ferromagnétiques - I. Le rôle de la distance entre les atomes magnétiques. *Journal de Physique et le Radium*, 1933, 4 (3), pp.109-117. <10.1051/jphys-rad:0193300403010900>. <jpa-00233138>

HAL Id: jpa-00233138

<https://hal.science/jpa-00233138v1>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

LE JOURNAL DE PHYSIQUE

ET

LE RADIUM

SUR UNE LOI DE RÉPARTITION DISCONTINUE
DES POINTS DE CURIE FERROMAGNÉTIQUES.

I. Le rôle de la distance entre les atomes magnétiques.

Par ROBERT FORRER.

Institut de Physique, Strasbourg.

Sommaire. — L'hypothèse du multiplet magnétique a pu rendre compte de la grandeur de l'aimantation rémanente dans les ferromagnétiques. L'introduction d'un multiplet électrique de même symétrie que le multiplet magnétique et placé comme lui par rapport au réseau et l'hypothèse des contacts efficaces entre les orbites de deux multiplets électriques voisins conduisent à ce que le ferromagnétisme du fer résulte des six atomes voisins de deuxième ordre. La distance entre deux voisins placés sur le même axe quaternaire du fer est appelée distance efficace et cette distance (2,8 Å) se retrouve en effet dans les combinaisons ferromagnétiques du fer et du manganèse. Par des considérations analogues on trouve la distance efficace pour le cobalt et le nickel (2,5 Å).

Une distance nettement inférieure à la distance efficace semble conduire, dans les métaux, au paramagnétisme constant et une distance plus grande au paramagnétisme variable.

1. Introduction. — Le ferromagnétisme est caractérisé par l'existence d'un moment atomique et son orientation spontanée. P. Weiss a pu rendre compte des divers phénomènes qui sont liés à ce ferromagnétisme par l'introduction de l'hypothèse du champ moléculaire (1911). Récemment, W. Heisenberg en a donné une possibilité d'interprétation reposant sur la théorie ondulatoire. Elle n'a pu être confrontée que sur peu de points avec l'expérience, de sorte que jusqu'à présent, elle n'a pu rendre grand service pour la compréhension de ce phénomène compliqué qu'est le ferromagnétisme.

Nous allons donc aborder de nouveau la discussion des faits expérimentaux. On a reconnu jusqu'à présent que *l'état solide* est nécessaire pour le ferromagnétisme. Aussi la plupart des auteurs sont-ils d'accord sur la nécessité d'un *réseau régulier*. En 1926, j'ai introduit l'hypothèse du multiplet magnétique (1). Elle a rendu compte de la grandeur de l'aimantation rémanente dans les ferromagnétiques à cristallisation confuse. Par de nombreuses expériences (2), je crois avoir démontré l'utilité de cette hypothèse. En prenant ce multiplet comme une réalité, je vais essayer de le confronter avec les autres données expérimentales qui sont en rapport avec l'orientation spontanée, le Point de Curie, le réseau, etc. Je serai forcé d'introduire quelques hypothèses que je considère comme des hypothèses de travail. Il faut qu'elles se justifient par le succès, leur signification profonde est sujette à révision.

(1) R. FORRER, *J. de Phys.* **10**, (1929), p. 247.

(2) R. FORRER et J. MARTAK, *J. de Phys.* **3** (1932), p. 418.

Nous prendrons par la suite le Point de Curie (Θ) comme expression du champ moléculaire. On sait en effet que d'après la théorie du champ moléculaire de P. Weiss $\Theta = nC$ où C est la constante de Curie et n la constante du champ moléculaire, définie par $H_m = n\sigma$.

Je crois nécessaire d'insister sur le fait que le Point de Curie ne dépend pas seulement du moment magnétique. Comme premier exemple je cite celui du fer et du cobalt dont les moments magnétiques au zéro absolu sont égaux à 11 et 8 1/2 magnétons de Weiss, mais dont les Θ , situés à 770 et 1130°C, se placent dans l'ordre inverse. Dans les solutions solides ferromagnétiques, le parallélisme de la marche du moment moyen et du Point de Curie est la règle (exemple, les nickel-cuivre, dont le moment et le Point de Curie s'abaissent avec la concentration en cuivre). Par contre dans les nickel-manganèse le moment magnétique moyen augmente ⁽¹⁾, tandis que le Point de Curie s'abaisse, inversement dans les nickel-silicium, le moment diminue et Θ augmente (inédit).

J'ai montré ⁽²⁾ que le nombre des moments constituants du multiplet lui aussi n'est en aucun rapport avec le nombre de magnétons de l'atome considéré. Il ne paraît pas impossible que ces deux ordres de phénomènes — ceux qui trouvent leur expression dans le Point de Curie et dans le multiplet — sans relation directe avec la grandeur du moment atomique, soient dépendants l'un de l'autre. C'est ce que je me propose d'examiner en recherchant si, de la combinaison du multiplet et du réseau, pourrait résulter le champ moléculaire.

Dans les considérations qui vont suivre des deux Points de Curie ce n'est que celui qui marque le commencement de l'orientation spontanée qui nous intéresse. Il s'agira donc implicitement du Point de Curie *ferromagnétique* (P. d. C., Θ).

2. Le multiplet électrique et le réseau. — *a) Multiplet magnétique et multiplet électrique.* — Le multiplet a été introduit pour rendre compte de la grandeur de l'aimantation rémanente dans les éléments ferromagnétiques. J'ai admis que le moment magnétique atomique est subdivisé en moments constituants, et que ceux-ci font dans le champ zéro certains angles entre eux. Ainsi le nickel possède un doublet à angle droit (fig. 1), le

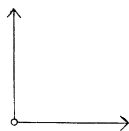


Fig. 1.

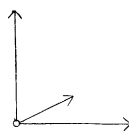


Fig. 2.

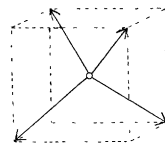


Fig. 3.

fer régulièrement cristallisé, un triplet trirectangle (fig. 2), et le cobalt (cristallisé dans le cube à faces centrées, $t > 470^\circ\text{C}$) un quadruplet disposé comme les quatre axes ternaires (fig. 3). L'essentiel pour le calcul de l'aimantation rémanente est l'hypothèse que le multiplet magnétique se trouve dans une certaine position normale vis-à-vis du réseau cristallin, que par exemple les moments constituants du triplet du fer sont parallèles à des axes quaternaires. Une telle position normale du multiplet magnétique pourrait résulter d'un champ réticulaire.

Jusqu'à présent je n'avais fait aucune hypothèse spéciale sur ce champ qui lie le multiplet magnétique au réseau cristallin, mais ici je fais une première hypothèse complémentaire : j'intercale entre le multiplet magnétique et le réseau un multiplet électrique qui a la même symétrie que le multiplet magnétique (dans le champ zéro). J'admets donc que chaque moment constituant du multiplet magnétique est perpendiculaire à une orbite et qu'il soit couplé d'une certaine façon à cette orbite. J'appelle l'ensemble des orbites ainsi définies un *multiplet électrique*. A chaque multiplet magnétique correspond un multiplet

⁽¹⁾ Ch. SADRON. *Thèse*, Strasbourg (1931).

⁽²⁾ R. FORRER et J. MARTAK, *loc. cit.*

électrique. La forme du multiplet électrique du nickel est indiquée dans la figure 4, celle de celui du fer, dans la figure 5 et celle du cobalt dans la figure 6. Je mentionne ici que je ne

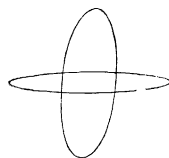


Fig. 4.

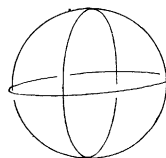


Fig. 5.

donne provisoirement aucune propriété dynamique à cette orbite. Je ne cherche qu'une forme d'une symétrie axiale, mais dont l'étendue est dans un plan. Cela peut donc être un anneau ou un disque, mais pour la simplicité du langage je conserve l'expression d'orbite.

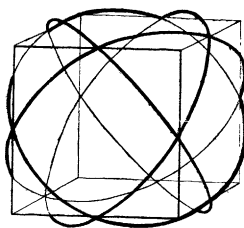


Fig. 6.

b) **Hypothèse fondamentale : le contact efficace.** — Pour continuer l'exposé j'utiliserai uniquement le triplet électrique du fer.

Je le place dans le réseau du fer; c'est le réseau du cube centré, stable jusqu'à 919°C, dont la maille est de 2,86 Å à la température ordinaire. Je rappelle qu'on peut considérer

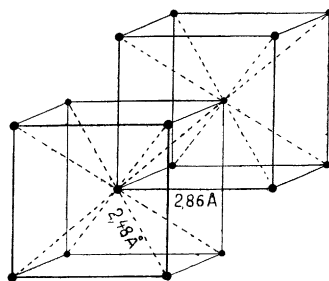


Fig. 7.

ce cube comme deux cubes simples, enchevêtrés l'un dans l'autre (fig. 7). Un atome possède huit voisins dans les directions des axes ternaires à la distance de 2,48 Å, je les appelle voisins ternaires. Ensuite il y a encore six voisins suivant les axes quaternaires à la distance de 2,86 Å (voisins quaternaires). Pour montrer que ces voisins quaternaires sont encore des voisins immédiats de l'atome considéré, on a représenté dans la figure 8 le volume élé-

mentaire qui appartient à un atome, et on voit que deux voisins quaternaires possèdent une surface carrée de contact. Il est vrai qu'elle est plus petite que celle qui est commune à deux voisins ternaires.

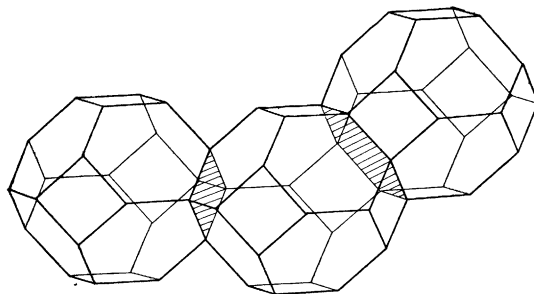


Fig. 8.

Par suite du parallélisme supposé entre le triplet électrique et le triplet magnétique, le plan d'une orbite du triplet électrique est perpendiculaire à un axe quaternaire. On dispose maintenant encore du diamètre de l'orbite et on peut lui donner une grandeur telle qu'elle touche les orbites de ses voisins dans le plan perpendiculaire à l'axe quaternaire. C'est dire que son diamètre devient égal à la distance des voisins quaternaires (2,86 Å). La figure 9

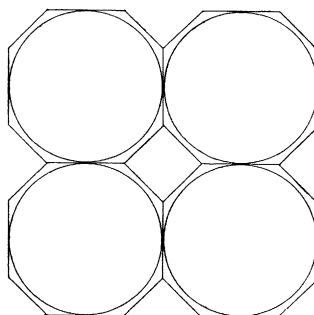


Fig. 9.

montre quelle est la place disponible pour une orbite dans son plan. La figure 10 montre l'emplacement du triplet électrique dans le volume élémentaire et de quelle façon il est situé vis-à-vis de ses voisins. Si on prend le diamètre de l'orbite égal à la distance de deux voisins quaternaires, les orbites se touchent dans ce plan et j'appelle ces contacts, *contacts efficaces*. Je fais l'hypothèse fondamentale que ces contacts efficaces sont nécessaires pour la production du ferromagnétisme. Ces contacts représentent donc un couplage entre les orbites des voisins quaternaires. De cette façon le moment constituant d'un triplet magnétique du fer est couplé au réseau, ce qui avait trouvé son expression dans la notion de la position normale.

J'admets donc que ce couplage entre orbites voisines donne lieu à un *réseau électronique d'orientation*. Ici il est constitué par trois électrons par atome. Je les appellerai électrons participants (plus généralement leur nombre sera n). Puisque l'orbite considérée appartient à l'atome de fer, on peut parler ainsi d'un diamètre quaternaire de l'atome du fer. Par contre les orbites ne touchent pas celles des atomes plus voisins situés sur les axes ternaires. Nous arrivons donc par l'hypothèse du triplet magnétique et l'hypothèse des

contacts efficaces à la conclusion à première vue assez étrange, que ce ne sont pas les huit voisins ternaires les plus rapprochés, mais les six voisins quaternaires de second ordre qui impriment au fer le champ moléculaire. J'appellerai *distance efficace*, la distance entre deux centres d'atomes qui par les contacts efficaces contribuent à l'orientation spontanée.

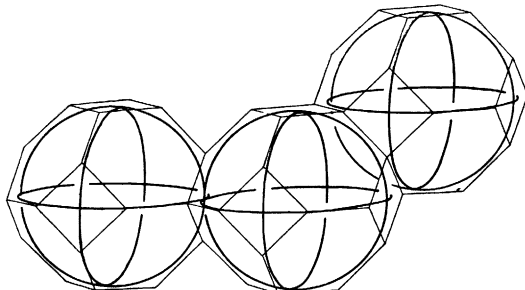


Fig. 10.

On peut essayer de vérifier cette hypothèse en cherchant la valeur numérique des distances dans des composés ferromagnétiques du fer, et en particulier se demander si la distance d'environ 2,86 Å joue un rôle prépondérant.

3. La distance des atomes ferromagnétiques dans des combinaisons définies.

— **Le fer et ses combinaisons.** — J'ai attribué le ferromagnétisme du fer α au couplage entre les orbites de deux multiplets électriques effectué par des contacts efficaces des orbites entre voisins situés suivant des axes quaternaires à la distance efficace de $d_{eff} = 2,86$ Å. On peut supposer que pour les combinaisons ferromagnétiques du fer, ce même contact efficace entre atomes de même espèce (Fe) est nécessaire pour la production du ferromagnétisme et que ces contacts efficaces se produisent uniquement, quand cette distance est de l'ordre de grandeur de la distance quaternaire des atomes de fer dans le fer α ($d_{eff} = 2,86$ Å).

J'ai réuni dans le tableau I quelques combinaisons ferromagnétiques du fer qui sont sûrement ferromagnétiques dans leur ensemble et dont le ferromagnétisme n'est pas apporté par une impureté ⁽¹⁾.

On peut y distinguer deux catégories : dans la première, contenant le fer α , le ferrobore et la cémentite, les voisins directs sont situés à différentes distances de l'atome considéré. On peut partager ces distances en deux classes. Les distances de 2,40 à 2,57 Å sont de l'ordre de la distance ternaire dans le fer α égale à 2,48 Å. Les distances de la deuxième classe allant de 2,66 à 2,86 Å sont de l'ordre de la distance quaternaire du fer α (2,86 Å) que nous avons appelée distance efficace. Dans cette première catégorie, des distances efficaces de l'ordre de 2,7 Å existent donc en effet — la moyenne est légèrement inférieure à la distance efficace du fer α — et à côté des distances plus courtes.

Dans la deuxième catégorie contenant les nitrures de fer (Fe^4N et Fe^3N), la pyrrhotine (FeS), la magnétite et l'hématite, les atomes de fer possèdent des voisins directs de fer *uniquement* à des distances (2,68 à 2,97 Å) de l'ordre de la distance quaternaire du fer α (2,86 Å).

Nous constatons donc que dans *toutes* les combinaisons ferromagnétiques du fer, la distance efficace de l'ordre de 2,8 Å *existe*. La *distance efficace* de l'atome de fer est donc, suivant le réseau et la combinaison, contenue dans un intervalle assez étroit qui va de 2,68 à 2,97 Å.

Cette constatation positive peut être renforcée par des raisons négatives. Le fer γ qui

⁽¹⁾ Les distances sont empruntées au livre : *Strukturbericht* 1913 — 1928 de P. P. EWALD et C. HERMANN. Leipzig 1931.

possède un *paramagnétisme constant* cristallise dans le cube à faces centrées avec la seule distance (Fe-Fe) de 2,57 Å. Ce corps à paramagnétisme constant ne possède donc *réellement pas* la distance de l'ordre de grandeur de 2,8 Å qui est apparue nécessaire pour le ferromagnétisme. Il semble donc qu'une distance plus courte que la distance efficace conduise à la propriété du paramagnétisme constant, mais le matériel manque ici pour appuyer cette hypothèse.

TABLEAU I. — Distances entre les atomes de fer (Fe—Fe).

QUALITÉ	CORPS	d	$d_{\text{eff.}}$
Ferromagnétisme.....	Fe α	2,48	2,86
	Fe 2 B	2,40	2,69
		2,44	2,72
	Fe 3 C	2,43	2,66
		2,55	2,68
		2,56	2,73
		2,57	
	Fe 4 N		2,68
	Fe 3 N		2,70
	FeS		2,89
	Fe 2 O 4		2,97
Fe 2 O 3		2,88	
		2,97	
Paramagnétisme, constant.....	Fe γ	2,57	
Paramagnétisme, variable.....	FeO	3,03	
	FeF 2	3,36	
	FeCO 3	3,75	

Il est intéressant de constater qu'il y a quelques ferrites (les ferrites de Ca, Zn et Cd) qui sont instables. Des recuits font baisser leur Point de Curie et le ferrite de zinc existe même dans les deux états, ferromagnétique et à paramagnétisme variable. Ceci prouve que les distances Fe-Fe (de 2,97 Å, comme pour la magnétite) se trouvent à la limite supérieure des distances efficaces pour le fer, et en effet FeO avec une distance très peu supérieure (3,03 Å) possède un paramagnétisme variable seulement.

J'ai ajouté quelques exemples de combinaisons à *paramagnétisme variable* qui suivent la loi de Curie ou celle de Weiss qui introduit un Point de Curie comme petite correction. Ceci nous montre que l'influence d'orientation d'un atome de fer sur un autre dans ces combinaisons est nulle ou négligeable. Les distances Fe-Fe (3,03, 3,36, et 3,75 Å) sont *nettement plus grandes* que les distances efficaces pour le ferromagnétisme.

Dans la pyrrhotine (FeS) l'atome de fer possède suivant l'axe ternaire deux atomes voisins de fer avec la distance efficace de 2,89 Å. Dans le plan perpendiculaire à l'axe ternaire les six atomes de fer ont des distances de 3,43 Å. C'est la distance habituelle des paramagnétiques variables ($d = 3,03, 3,36, 3,75$ Å) et, comme le démontre cette propriété, l'influence mutuelle peut être considérée comme négligeable à cette distance. La pyrrhotine (et les autres combinaisons ferromagnétiques de même réseau) ne possède donc que deux voisins à des distances efficaces.

b) **Le manganèse et ses combinaisons.** — Il semble que les combinaisons du Mn

subissent exactement la même influence de la distance en ce qui concerne l'état magnétique (voir tableau II). Les ferromagnétiques Mn^4N , MnAs , et MnSb possèdent des distances Mn-Mn de la même grandeur que la distance efficace du fer (2,86 Å) et de ses combinaisons ferromagnétiques. L'alliage de Heusler (Cu^2AlMn) à cube centré possède également une distance efficace voisine (2,95 Å), tandis que le $\text{Mn}\gamma$ avec les petites distances de 2,58 et 2,67 Å est à paramagnétisme constant comme le fer γ . Les distances des combinaisons du manganèse à paramagnétisme variable MnO , MnF^2 et MnCO^3 ont, comme les combinaisons correspondantes du fer, des distances plus grandes que la distance de l'ordre de 2,8 Å réclamée pour le ferromagnétisme. En ce qui concerne les distances nécessaires pour le paramagnétisme constant, le ferromagnétisme et le paramagnétisme variable, le manganèse semble donc ne se distinguer en rien du fer.

TABLEAU II. — Distances entre les atomes de manganèse (Mn—Mn).

QUALITÉ	CORPS	d	d_{eff}
Ferromagnétisme.....	} Mn^4N MnAs MnSb Cu^2AlMn	} 2,55	2,74
			2,83
			2,85
			2,89
			2,95
Paramagnétisme, constant.....	} $\text{Mn}\gamma$	} 2,58 2,67	
Paramagnétisme, variable.....	} MnO MnF^2 MnCO^3 MnO^2	} 3,12 3,30 3,75 2,87	

Il faut que j'insiste ici sur quelques points particuliers. Nous avons vu que le fer γ ($d = 2,57$ Å) est à paramagnétisme constant. Dans le nitrure de fer Fe^4N les atomes de fer se disposent, comme dans le fer γ , suivant un réseau du cube à faces centrées, mais par l'introduction de l'azote la maille est agrandie. La distance est maintenant de l'ordre de la distance efficace et effectivement le corps possède du ferromagnétisme. Le même phénomène se produit pour le manganèse (¹). L'introduction de l'azote augmente les distances entre les atomes de manganèse primitivement de 2,58 et de 2,67 Å; portées à 2,74 et à 2,83 Å; elles deviennent des distances efficaces et le corps lui-même ferromagnétique.

Dans l'alliage de Heusler Cu^2AlMn qui cristallise comme le fer dans le cube centré, mais qui présente des surstructures, la distance de 2,55 Å existe entre l'aluminium et le cuivre et entre le manganèse et le cuivre, tandis que la distance efficace du manganèse (2,95 Å) se rencontre entre les atomes de manganèse et d'aluminium. D'après la règle des distances on doit donc admettre que le ferromagnétisme des alliages de Heusler est dû au fait que les atomes de manganèse possèdent des voisins d'aluminium aux distances efficaces.

Une certaine distance est donc nécessaire pour le ferromagnétisme, mais l'existence de cette distance ne conduit pas nécessairement au ferromagnétisme, comme le démontre le cas MnO^2 dont les distances Mn—Mn sont de 2,87 Å, donc exactement de l'ordre des distances ferromagnétiques. MnO^2 est à paramagnétisme variable.

(¹) R. OCHSENFELD, *Ann. der Phys.* 42 (1932), p. 333.

c) **Le cobalt, le nickel, et le chrome.** — Le cobalt, stable dans le réseau hexagonal jusqu'à la température de 470°, (cobalt *h*) est ferromagnétique et possède une distance $\text{Co} - \text{Co} = 2,51 \text{ \AA}$ (voir tableau III). Au-dessus de cette température il est stable dans le réseau γ (cube à faces centrées), et est ferromagnétique avec la même distance de 2,51 Å. Pour le cobalt la distance efficace est donc de 2,51 Å. La distance efficace du nickel γ (cube à faces centrées) est de 2,49 Å. La distance efficace du cobalt et du nickel est donc pratiquement la même (2,5 Å), comme nous avons la même distance efficace pour le fer et le manganèse.

TABLEAU III. — Distances entre les atomes Ni—Ni et Co—Co.

QUALITÉ	CORPS	<i>d</i>	<i>d</i> _{eff.}	
Ferromagnétisme.....	Co <i>h</i>		2,51	
	Co γ		2,51	
	Ni γ		2,49	
	(Ni ² B)		2,63	.35
			2,69	2,42
Paramagnétisme.....	Ni <i>h</i>	2,60		
		2,66		
	NiS	2,65		

Le nickel déposé dans l'hydrogène par le procédé cathodique, cristallise dans le réseau hexagonal avec des distances de 2,60 et 2,66 Å. Il n'est pas ferromagnétique, il semble donc que ces distances soient trop grandes pour être efficaces. Le sulfure de nickel NiS qui correspond à la pyrrhotine, n'est pas ferromagnétique et possède aussi des distances de l'ordre de celles du Ni *h* (2,65 Å).

Le borure de nickel Ni²B qui cristallise dans le même système tetragonal que le borure de fer, possède comme ce dernier deux catégories de distances. Trois atomes voisins sont à des distances courtes, 2,35 et 2,42 Å, tandis que huit autres voisins directs sont à de longues distances (2,63 et 2,69 Å). Comme nous a montré l'exemple du Ni *h* et de NiS, la distance 2,6 Å n'est pas une distance efficace. Il reste dans le borure de nickel, comme distances efficaces possibles, les petites distances de 2,35 et 2,32, distances qui sont encore un peu plus petites que celles du nickel γ (2,49 Å) ⁽¹⁾.

Ces exemples nous apprennent que la distance efficace pour le nickel et le cobalt est de l'ordre de 2,4 à 2,5 Å.

On peut en tirer deux conclusions intéressantes : puisque dans la plupart des combinaisons du nickel ou du cobalt les distances Ni — Ni ou Co — Co sont plus grandes que la distance efficace (2,5 Å environ), ces combinaisons doivent être toutes à paramagnétisme variable. Il en est bien ainsi. D'autre part, si, comme dans le cas du fer, la distance nécessaire pour le paramagnétisme constant est plus petite que la distance efficace, on ne doit pas trouver cette propriété dans les combinaisons du Co et du Ni, parce qu'une plus petite distance ne s'y rencontre pas.

Le chrome est ferromagnétique dans une seule combinaison définie : CrTe avec la distance efficace de 3,10 Å (type de la pyrrhotine).

Nous avons donc trouvé trois catégories de distances efficaces dans les ferromagnétiques. Elle est de 3,1 pour le Cr, de 2,8 pour le Fe et le Mn et de 2,5 Å pour le Co et le Ni.

⁽¹⁾ Le borure de nickel est ferromagnétique d'après MOISSAN. *Ann. Ch. P.*, 9 (1896), p. 277. Un essai d'obtenir ce ferromagnétique par fusion (Marian, inédit) n'a pas réussi.

Je montrerai plus tard qu'on peut déterminer par une voie analogue les distances efficaces dans le cuivre et le zinc, parce que ces éléments forment des alliages qui possèdent, comme les ferromagnétiques, un réseau électronique d'orientation mais qui ne peuvent être ferromagnétiques parce qu'il leur manque le moment magnétique.

Conclusion. — Nous avons vu qu'une condition nécessaire pour le ferromagnétisme est que la distance entre les atomes magnétogènes tombe dans un intervalle de distances assez étroit. Nous avons appelé ces distances des « distances efficaces ». Elles sont différentes pour les différents atomes. Les limites de l'intervalle des distances efficaces pour le fer et le manganèse seraient de 2,7 et 3,0 Å, pour le cobalt, et le nickel de 2,4 et 2,5 Å. Pour le chrome la distance efficace serait de 3,1 Å. Le fait que le fer et le manganèse forment facilement des combinaisons ferromagnétiques provient de ce que la distance efficace pour ces deux atomes est légèrement supérieure au diamètre des atomes, si on les considère comme sphériques. Nous avons constaté que si la distance est au-dessous de la distance efficace, on observe un paramagnétisme constant, et si elle est plus grande, un paramagnétisme variable. Le paramagnétisme constant peut être observé fréquemment pour le fer, le manganèse et le chrome seulement, parce que la distance efficace est plus grande que le diamètre des atomes. Pour le cobalt et le nickel les distances efficaces sont de l'ordre du diamètre des atomes.

D'après l'idée de P. Weiss ⁽¹⁾ on peut interpréter le paramagnétisme constant par la compensation de deux moments dans les atomes voisins résultant de la position antiparallèle de ces moments. L. Néel ⁽²⁾ attribue cet antiparallélisme à un champ moléculaire négatif. Le ferromagnétisme ainsi que le paramagnétisme constant seraient donc caractérisés par une orientation spontanée des moments, parallèles dans l'un des cas, antiparallèles dans l'autre.

Dans la théorie ondulatoire du ferromagnétisme de W. Heisenberg, l'intégrale d'échange doit être positive pour obtenir un champ moléculaire positif, c'est-à-dire du ferromagnétisme. Mais il semble que dans la plupart des cas on obtienne une intégrale d'échange négative à laquelle on pourrait attribuer le champ moléculaire négatif dans le sens de L. Néel. D'après ce qui a été exposé plus haut, l'obtention d'une intégrale d'échange positive ou négative devrait dépendre des distances auxquelles se trouvent les atomes magnétogènes.

La discussion de la position du multiplet magnétique et électronique dans le réseau nous a donc permis de reconnaître une nouvelle condition nécessaire pour le ferromagnétisme : la distance efficace. Dans un travail ultérieur je mettrai le multiplet électrique et les contacts efficaces en relation avec les Points de Curie.

⁽¹⁾ *C. R.* **182** (1926), p. 405.

⁽²⁾ *These*, Strasbourg, 1931.