HAL
open science

Étude de l'aimantation des corps ferromagnétiques au-dessus du point de Curie

Pierre Weiss, G. Foex

▶ **To cite this version:**

Pierre Weiss, G. Foex. Étude de l'aimantation des corps ferromagnétiques au-dessus du point de Curie. J. Phys. Theor. Appl., 1911, 1 (1), pp.805-814. 10.1051/jphystap:01911001010080500 . jpa-00241609

HAL Id: jpa-00241609

https://hal.science/jpa-00241609v1

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.

ÉTUDE DE L'AIMANTATION DES CORPS FERROMAGNÉTIQUES AU-DESSUS DU POINT DE CURIE [1].

Par MM. Pierre WEISS et G. FOEX.

Les ferronickels. — Les questions que nous avons cherché à résoudre dans cette étude des ferronickels sont les suivantes :

1. Comment la constante de Curie et les autres propriétés magnétiques d'une solution solide dépendent-elles des propriétés des métaux composants?

2. Peut-on déduire de l'étude de ces alliages *au-dessus* de leurs points de Curie des renseignements nouveaux sur leur constitution [2]?

Les expériences ont été faites sur des alliages préparés à partir de nickel pur et de fer électrolytique, de même provenance (Merck) que les métaux qui ont été étudiés dans la première partie de ce travail. Les alliages ont été préparés par fusion directe des composants dans un four électrique à résistance et dans une atmosphère d'hydrogène.

Ces alliages, dont les teneurs sont échelonnées de 10 en 10 0/0, ont déjà servi à une étude de M. F. Hegg [3] sur l'aimantation à saturation à différentes températures.

Les échantillons étaient taillés en forme d'ellipsoïdes. Le même appareil a servi à faire les mesures. Pour produire les températures élevées, on a employé un four à carcasse en nickel. Dans le voisinage du point de transformation, où le nickel aurait pu modifier le champ, on lui a substitué un four à carcasse en cuivre. Malgré cela, dans le voisinage du point θ, il y a toujours un ou deux points qui tombent au-dessus des courbes expérimentales. Il s'agit là du phénomène déjà rencontré dans l'étude du nickel et du cobalt et qui dépend des propriétés au voisinage immédiat du point de Curie.

Les alliages ont toujours été chauffés dans un courant d'hydrogène. Les ellipsoïdes étaient, comme d'habitude, portés par une coupelle de platine fixée à l'extrémité du tube de quartz. On empêchait le contact entre l'alliage et le platine en interposant une mince couche de magnésie.

---

(1) Voir ce volume p. 744.

(2) Voir aussi P. Weiss, *Revue de Métallurgie*, vol. VI, p. 680 (1909).

(3) F. Hegg, *Arch. des Soc. phys. et nat.*, t. XXIX, p. 592, et t. XXX, p. 15 (1910).

Article published online by EDP Sciences and available at http://dx.doi.org/10.1051/jphystap:01911001010080500

La correction du magnétisme du support (1 à 2 0/0) a été faite.

La représentation graphique des résultats, dans laquelle, comme précédemment, on a porté les températures en abscisses et les valeurs de $1 : \chi$ en ordonnées, est contenue dans les *fig.* 1 et 2.

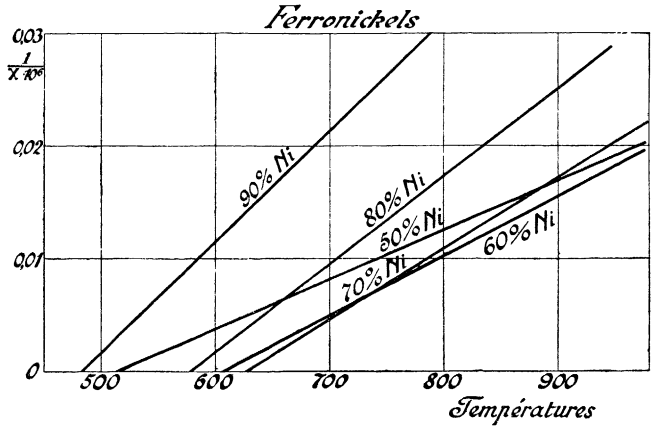

FIG. 1.

Tous les ferronickels dont la teneur en nickel est supérieure à 40 0/0 donnent, de même, une droite unique. On trouvera leurs points de Curie et leurs constantes de Curie dans le tableau *III*.

Alliage : 60 0/0 *fer*, 40 0/0 *nickel.* — En partant des températures élevées et en faisant décroître la température, on trouve d'abord (*fig.* 1) une portion de droite donnant la constante de Curie 0,0256. Une deuxième série faite à températures croissantes a donné des points qui, à un petit décalage constant près, retombent sur la même droite. Ce décalage est dû probablement à un mauvais réglage du corps au maximum d'attraction. Cette première portion de droite est donc réversible. Le point de Curie qui lui correspond est à $\Theta = 423° + 273°$ environ, avec $C = 0,0251$.

Au-dessous de 790° se trouve une région de transition où la courbe représentative a la même forme que la courbe de la magnétite dans la région de passage. On retrouve ce genre de transformation, que nous avons désigné par la lettre ψ pour les alliages suivants, à peu près à la même température.

A partir de 730° et toujours à température décroissante, on trouve

une deuxième droite pour laquelle C = 0,047 et θ = 335° + 273°. Au-dessous de 730°, le phénomène est irréversible : aux températures croissantes, on trouve des points situés au-dessous de ceux obtenus quand la température décroît ; la courbe ascendante tendant à rejoindre la courbe descendante quand on se rapproche de 730°. Mais l'étude du phénomène est compliquée par sa dépendance variable du temps dans les régions irréversibles. La région ψ est encore réversible.

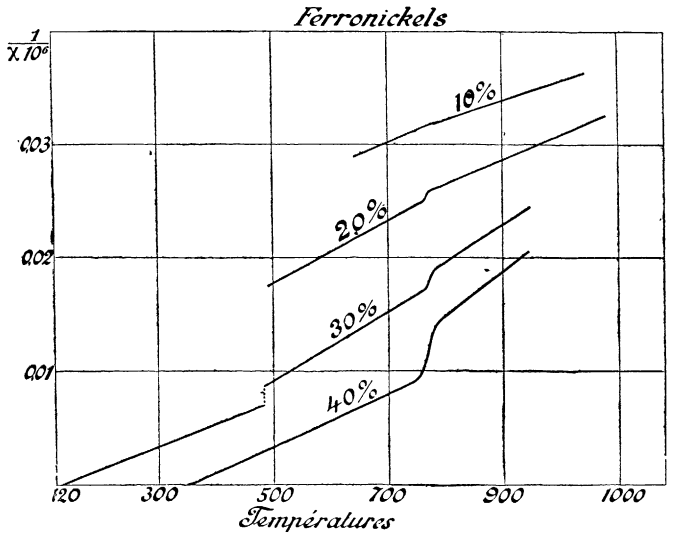

Fig. 2.

La dernière série d'expériences a mis en évidence une troisième droite, non représentée dans la figure, réversible dans une région de faible étendue et caractérisée par : C = 0,091 et Θ = 300° + 273°.

Les trois alliages suivants, à 30, 20 et 10 0/0 de nickel, ont présenté beaucoup d'analogie, au point de vue expérimental, avec celui à 40 0/0. Ils ont manifesté les mêmes irréversibilités, le phénomène désigné par ψ et ont donné lieu à plusieurs températures Θ et constantes de Curie correspondant à des intervalles de température relativement restreints. Après l'alliage à 40 0/0 pris comme exemple, il n'y aurait guére d'intérêt à reproduire le détail des observations faites sur les autres. Nous nous bornons à donner les résultats dans le tableau IV.

GROUPEMENT ET DISCUSSION
DES RÉSULTATS SUR LES FERRO-NICKELS.

Il est nécessaire de dire ici que tous les renseignements que nous donnons sur le côté réversible du diagramme ont un caractère de

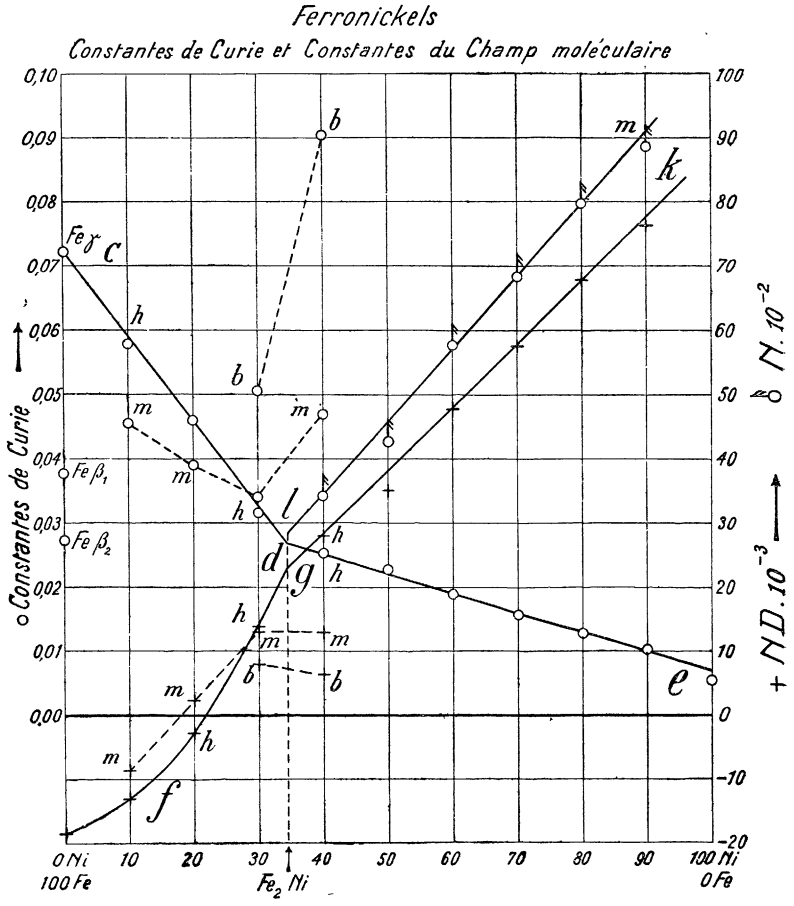

FIG. 3.

précision plus grand que ceux relatifs aux déterminations et aux conclusions sur les alliages irréversibles. Cela tient aux difficultés plus grandes des expériences sur ces derniers et à ce qu'un nombre bien plus

grand d'alliages et de mesures eussent été nécessaires pour caractériser avec certitude une telle multiplicité d'aspects. Aussi, tandis que la physionomie générale des réversibles résulte clairement de notre

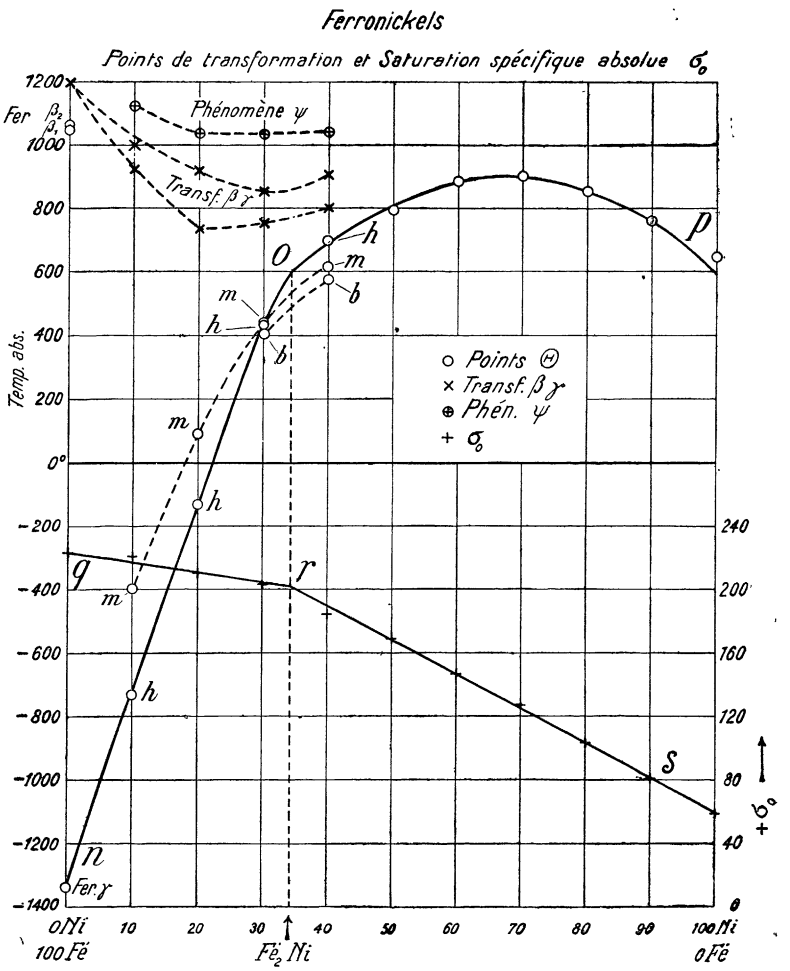

FIG. 4.

travail, nous n'avons pas, pour les irréversibles, abouti à une vue d'ensemble et une partie seulement de leurs propriétés, celles aux températures les plus élevées, ont pu être classées avec régularité en

fonction de la teneur. Néanmoins nous avons noté dans les tableaux III, IV et VI et représenté dans les *fig.* 3 et 4 même les observations isolées ou raccordées par petits groupes, pensant qu'on y trouverait des indications utiles pour l'orientation des recherches ultérieures [1].

TABLEAU III.

Reversibles.

Ni 0/0	C	Θ abs.	$\frac{\Theta}{C}$ = ND	D densité (Hegg)	N	Satur. spec. σ° abs. (Hegg)
100	0,00555	645°	116 000	8,86	8,870	58,8
90	0,0100	763	76 300	8,60	7,970	80,6
80	1265	856	67 700	8,50	6,840	103,1
70	157	903	57 500	8,40	5,770	127,1
60	185	885	47 800	8,30	4,280	146,8
50	227	797	35 100	8,20	3,440	169,2
40 (irrév.)	251	700	27 900	8,10		184,2
		Fe^2Ni *par interpolation*				
34,4	0,0267	870	23 200	8,05	2,840	202,0

TABLEAU IV.

Irréversibles.

Ni 0/0	Hautes températures C	Hautes températures Θ abs.	Hautes températures ND	Moyennes températures C	Moyennes températures Θ abs.	Moyennes températures ND
40	0,0251	— 790°	27.900	0,047	608°	12.930
30	315	435°	13.800	34	442°	13.000
20	460	— 130°	— 2.820	39	90°	2.750
10	577	— 732°	— 13.150	455	— 396°	— 8.700

Ni 0/0	Basses températures C	Θ abs.	ND	D	σ°
40	0,091	573°	6.300	8,10	184,2
30	0,051	405°	7.940	8,06	203,6
20	—	—	—	8,02	210,8
10	—	—	—	7,89	221,0

TABLEAU V.

Fer.

	C	Θ abs.	$\frac{\Theta}{C}$ = ND
Fer β_1	0,0390	1.047°	26.800
β_2	0,0274	1.063°	38.800
γ	0,072	— 1.340°	— 18.600

Constantes de Curie. — En représentant les constantes de Curie

[1] Une étude spéciale des irréversibles est en voie d'exécution.

des réversibles et pour les irréversibles celles qui correspondent aux températures les plus élevées (h) en fonction de la teneur, on obtient la ligne brisée *cde* de la *fig.* 3. La droite *de* est assez bien déterminée par un nombre suffisant de points, pour que l'on puisse affirmer que du côté réversible la preuve expérimentale de la variation linéaire de la constante de Curie est faite. Il semble bien qu'il en soit de même du côté des irréversibles, mais ici on ne peut être aussi affirmatif, pour les raisons que nous avons indiquées. La droite *de* ne passe pas par le point extrême correspondant au nickel pur. L'écart de 25 0/0 ne peut être dû à une erreur d'expérience. La droite *cd*, au contraire, semble passer par le point correspondant au fer γ; mais cette coïncidence doit être notée sous toutes réserves, la constante de Curie du fer γ étant la moins certaine parmi toutes celles que nous avons déterminées au cours de ce travail. La droite *de* qui représente les constantes de Curie du côté du nickel passe assez exactement par le point correspondant au fer β_1, mais il est presque certain que cette dernière coïncidence est fortuite, puisque les intermédiaires à 10, 20, 30 0/0 de nickel font défaut.

Le point d'intersection des deux droites *cd* et *de* correspond à la composition 34,4 Ni, 65,6 Fe, c'est-à-dire à la formule Fe_2Ni. Cette combinaison n'a pas encore été signalée. Guertler et Tammann [1], qui ont déterminé le diagramme des points de fusion des ferronickels, indiquent bien un maximum anguleux dans le voisinage de cette composition. Mais, chose curieuse, tandis qu'ils ne tirent aucune conclusion de ce caractère habituel des combinaisons chimiques, ils font l'hypothèse gratuite de l'existence de la combinaison $FeNi_2$ qui serait révélée par le minimum arrondi de leur courbe de fusion. Nous ne tarderons pas à rencontrer d'autres arguments en faveur de l'existence de la combinaison Fe_2Ni. Elle départage assez exactement les ferronickels réversibles et irréversibles, au sens que l'on attribuait à ces termes, à la suite de l'étude, notamment, du magnétisme fort aux basses températures. Cette limite ne peut être maintenue aux températures relativement élevées, où, nous l'avons vu, l'alliage à 40 0/0 de nickel devient, lui aussi, irréversible.

Les ferronickels forment donc, au moins aux hautes températures, deux séries ininterrompues de solutions solides s'étendant d'une part entre Fe et Fe_2Ni et de l'autre entre Fe_2Ni et Ni.

---

(1) *Zeitschr. für Anorg. Chemie*, 45, p. 205 (1905).

La variation linéaire de la constante de Curie dans chacun de ces intervalles peut donc s'énoncer en généralisant : *Dans une solution solide de deux métaux magnétiques la constante de Curie est additive.* Si la théorie du paramagnétisme de Langevin est exacte, cette propriété en résulte immédiatement, chaque molécule contribuant au moment magnétique résultant indépendamment de ses voisines et dans la mesure où l'agitation thermique le lui permet. Mais le mode de détermination des constantes de Curie que nous avons employé dans ce travail implique l'exactitude de la théorie du champ moléculaire. Si elle était fausse, les quantités déterminées pourraient ne pas être des constantes de Curie. L'additivité vient donc aussi à l'appui de la théorie du champ moléculaire.

Nous avons porté dans la même *fig.* 4 (points *m* et *b*) les déterminations fragmentaires de constantes de Curie correspondant aux températures moyennes et basses dans les irréversibles.

Températures de transformation. — Les températures absolues des points de Curie Θ ont été portées dans la *fig.* 4. La courbe en traits pleins *nop* correspond aux constantes de Curie représentées dans la *fig.* 3 par la ligne brisée *cde*. Cette courbe n'avait jamais été étendue à tout l'intervalle de Fe à Ni. En outre, dans la partie anciennement connue par l'étude des ferronickels réversibles, notre tracé se distingue de ceux des observateurs précédents par l'angle vif en *o*. On voit que si la marche des points de transformation n'impose pas la combinaison Fe_2Ni, elle lui est du moins favorable. Ici encore les déterminations fragmentaires en moyennes et basses températures ont été marquées aux points *m* et *b*.

Dans la même figure ont encore été représentées les données qui figurent au tableau suivant :

TABLEAU VI.

	Phénomène ψ		Transformation $\beta\gamma$	
Ni 0/0	Température	$\Delta\chi$	Temp. asc.	Temp desc.
			1.193° abs.	
10	1.121° abs.	$+ 0,4 \cdot 10^{-6}$	1.000°	925°
20	1.035°	$- 2,15 \cdot 10^{-6}$	920°	735°
30	1.035°	$- 5,7 \cdot 10^{-6}$	850°	750°
40	1.043°	$- 33,6 \cdot 10^{-6}$	900°	800°

Nous avons appelé phénomène ψ la variation assez rapide de χ, localisée dans un intervalle de quelques degrés ou quelques dizaines

de degrés, qui se manifeste dans les représentations graphiques par des points d'inflexion. Sauf pour l'alliage à 10 0/0, où le phénomène est peu marqué et par conséquent difficile à préciser, il se produit à une température presque exactement constante. Son amplitude est donnée par la colonne $\Delta\chi$ du tableau VI. C'est la grandeur de la variation rapide du coefficient d'aimantation avec le signe qu'elle a quand la temperature croît.

Les données trop incomplètes sur ce phénomène ne nous ont pas permis de faire une hypothèse sur sa nature.

Les deux dernières colonnes du tableau indiquent une transformation qui se caractérise par une variation considérable du coefficient d'aimantation à température constante, qui se rattache par continuité à la transformation $\beta\gamma$ du fer. Comme celle-ci, elle exige un certain temps, mais sa lenteur croît beaucoup avec la richesse en nickel. En même temps la température qui, aux conséquences de cette lenteur près, est la même pour le fer aux températures croissantes et décroissantes, se dédouble d'une manière marquée en fonction de la teneur en nickel. Les nombres que nous donnons n'ont pas le caractère de limites précises, ce sont les températures auxquelles le phénomène commençait à prendre une importance marquée. Il n'est possible, non plus, de dire si le dédoublement du point de transformation dans les ferro-nickels est apparent ou réel, une étude de l'influence du temps n'ayant pas été faite.

Constante du champ moléculaire. — Le champ moléculaire H_m a été défini par l'équation déjà citée :

$$H_m = Ni, \tag{2}$$

et le coefficient N ainsi introduit figure dans :

$$CND = \Theta, \tag{3}$$

où D est la densité.

Nous avons calculé les quotients C = ND (tableaux III, IV, V), et nous les avons représentés dans la *fig.* 3. Nous obtenons pour les réversibles et les irréversibles aux hautes températures (points *h*) la ligne *fgk*. *gk* est rectiligne au degré de précision des expériences. *Pour les ferro-nickels réversibles, auxquels s'ajoute l'alliage à* 40 0/0 *de nickel aux hautes températures, la variation de* ND *est linéaire.* La variation de la même quantité du côté des alliages à faible teneur en nickel est représentée par une courbe. Mais, à part les réserves

déjà faites sur la précision du point correspondant au fer γ, les alliages irréversibles sont trop peu nombreux pour qu'on puisse affirmer qu'une singularité entre Fe et Fe_2Ni n'a pas passé inaperçue. On ne peut donc dire actuellement si cette intéressante loi linéaire n'est qu'un cas particulier ou représente une propriété générale des solutions solides de métaux magnétiques. De nouvelles expériences sont nécessaires sur cette question.

Dans les cas où cette loi est valable, elle entraîne comme conséquence *la forme parabolique de la courbe représentant* Θ *en fonction de la teneur*, qui avait été déjà remarquée par les observateurs antérieurs. Dans la *fig.* 4 nous avons adopté, de *o* en *p*, un tracé parabolique qui, nécessairement, passe à côté du point correspondant au nickel pur, auquel ne s'étendent pas les deux lois linéaires.

Les tableaux III et IV contiennent encore les densités D, déterminées graphiquement d'après les observations de Hegg, en tenant compte de ce que celles qu'il donne pour 30 et 40 0/0 de nickel, sont trop faibles, par suite de la porosité de la matière. Au moyen de ces densités ont été calculées les valeurs du coefficient N représentées en *lm* (*fig.* 3). La variation de la densité dans les ferro-nickels est trop faible pour que l'on puisse dire si la variation linéaire est plus approchée pour le produit ND ou pour le coefficient N lui-même.

Autres faits à l'appui de l'existence de la combinaison Fe_2Ni. — Le coude en *g* (*fig.* 3), dans la représentation de ND en fonction de la composition des alliages suggère nettement l'existence de la combinaison Fe_2Ni.

D'autre part, les expériences de M. Hegg sur l'aimantation à saturation des ferronickels à diverses températures [1], qui ont été étendues jusqu'à la température de l'air liquide, ont permis, par une extrapolation n'introduisant qu'une faible incertitude, de déterminer la saturation spécifique au zéro absolu σ_0. Cette quantité a été notée dans les tableaux III et IV et représentée graphiquement en *qrs* dans la *fig.* 4. Tant que l'on considérait les ferronickels comme une suite unique de solutions solides, la valeur de σ_0, plus élevée que l'indiquait la loi des mélanges, était très surprenante. Elle s'explique au contraire fort bien, comme on s'en rend compte sur la *fig.* 4, par la combinaison Fe_2Ni. *Le moment magnétique moléculaire, additif dans les solutions, cesse de l'être dans la combinaison chimique.*

---

[1] F. Hegg, *loc. cit.*