

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 81 (1990)

**Heft:** 15

**Artikel:** Nouveaux types d'aimants NdFeB à comportement amélioré vis-à-vis de la corrosion et de la température

**Autor:** Tenaud, Philippe / Vial, Fernand / Sagawa, Masato

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-903143>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 23.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Nouveaux types d'aimants NdFeB à comportement amélioré vis-à-vis de la corrosion et de la température

Philippe Tenaud, Fernand Vial, Masato Sagawa

**Les propriétés des aimants NdFeB frittés ont été améliorées grâce à des substitutions de métaux réfractaires tel le vanadium. Des conditions opératoires telle  $-B/\mu_0 H = 0,5$  à  $180^\circ\text{C}$  sont devenues possibles. La résistance à la corrosion est très fortement améliorée, grâce à l'efficacité du blocage de la diffusion de l'oxydation de la phase riche en Nd. Des revêtements organiques permettent d'atteindre des durées de vie en test à l'autoclave cinq fois supérieures à celles mesurées sur les aimants NdFeB connus jusqu'à présent.**

**Durch Zusätze von Vanadium ist es gelungen, die Eigenschaften der gesinterten NdFeB-Magnete wesentlich zu verbessern. Ihre Anwendung ist nun für Arbeitspunkte bis zu  $-B/\mu_0 H = 0,5$  bei Temperaturen von  $180^\circ\text{C}$  möglich. Die Korrosionsbeständigkeit konnte durch Mikrostrukturen, die eine Ausbreitung der Oxidation verhindern, stark verbessert werden. Versehen mit einer Kunststoffbeschichtung erreichen diese Magnete im Korrosionstest im Autoklaven eine fünfmal längere Lebensdauer als die bisherigen NdFeB-Magnete.**

## Adresses des auteurs:

Dr.-ing. Philippe Tenaud et Dr.-ing. Fernand Vial, Aimants Ugimag BP2, F-38830 St-Pierre d'Allevard, France, et Dr. Masato Sagawa, Intermetallics Co. Ltd, Kyoto 615, Japon

Le développement des aimants NdFeB a été fortement limité par leur mauvaise stabilité thermique et leur grande sensibilité en atmosphère oxydante. De nombreux travaux ont été réalisés ayant pour but de résoudre ces deux problèmes majeurs. Des additions d'Al ont permis d'augmenter la coercitivité à température ambiante [1] sans pour autant améliorer la stabilité thermique [2]. La coercitivité peut également être doublée par les additions coûteuses de terres rares lourdes telles Dy, Tb ou Ho; malheureusement la rémanence décroît alors sensiblement en raison de leur couplage antiparallèle avec le fer. Les substitutions de Co au Fe permettent d'augmenter la température de Curie [3] et de réduire la sensibilité à la corrosion [4]; cependant la coercitivité décroît très vite, bien que l'anisotropie magnétocristalline soit peu réduite [5]. Enfin certains auteurs ont montré que des additions de 1...3 at % de métaux tels Nb, Ti ou Zr augmentent la coercitivité [6].

Nous présentons ici les résultats obtenus grâce à l'addition de vanadium à des teneurs voisines de 3...5 at %. Dans ce cas le diagramme de phases est modifié de façon telle que la phase NdFe<sub>4</sub>B<sub>4</sub> n'est plus formée. Elle est remplacée par des composés de formule V<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub> qui sont localisés dans l'aimant tant aux joints de grains – dans la phase riche en Nd en pontant les grains magnétiques – que sous forme de précipités à l'intérieur des grains magnétiques [7]. Le Co, s'il est ajouté, se substitue partiellement au Fe dans la phase magnétique et forme des composés intermétalliques Nd-Co dans les joints de grains.

## Procédure expérimentale

Des lingots, élaborés à partir d'alliages Nd-Fe, Dy-Fe, Fe-B, Fe-V industriels, de Fe, d'Al et de Co purs ont été coulés aux compositions nominales listées dans la figure 1. Les ai-

mants ont été obtenus par métallurgie des poudres incluant notamment un broyage à jet d'azote, une compression axiale parallèle, un frittage en phase liquide et un revenu. Un revêtement organique a été appliqué après une préparation de surface appropriée.

Après saturation en bobine pulsée de 6 tesla, les mesures magnétiques ont été réalisées dans un hystérésigraphe produisant un champ variable de 0...3 tesla à des températures comprises entre  $20^\circ\text{C}$  et  $180^\circ\text{C}$ . Les pertes irréversibles ont été mesurées en bobine de Helmholtz après un maintien de deux heures à la température de mesure ( $20^\circ\text{C}$ ... $210^\circ\text{C}$ ).

Les tests de corrosion accélérés ont été réalisés en étuve humide ( $80^\circ\text{C}$  – 90% rH) et en autoclave ( $115^\circ\text{C}$  – 1.75 bar – 100% rH). La résistance à la corrosion a été quantifiée sur aimants non revêtus par mesure de prise de poids et sur aimants revêtus par test d'adhésion du revêtement après test en étuve humide.

## Propriétés magnétiques à température ambiante

Une addition de 4 at % de V procure une augmentation de coercitivité d'environ 400 kA/m (5 kOe) tant sur la famille NdFeVB que sur la famille NdDyFeVB. Cet effet doit être attribué à une amélioration de la microstructure des aimants. En effet comme le montrent les analyses en microscopie à balayage (SEM-EDAX) le vanadium n'est que très peu soluble dans la phase magnétique; il ne modifie donc pas la valeur de l'anisotropie magnétocristalline de cette phase. En conséquence, les effets d'augmentations de  $H_{ci}$  dus respectivement au Dy (augmentation d'anisotropie magnétocristalline) et au V (meilleure microstructure) sont simplement ajoutés de manière cumulative – voir aimant 6 – conduisant ainsi à des coercitivités de l'ordre de 2000 kA/m (25 kOe).

Aimant	1	2	3	4	5	6
Composition chimique						
Nd [at %]	15	15	13,5	15	15	13,5
Dy [at %]	0	0	1,5	0	0	1,5
Co [at %]	0	5	0	0	5	5
V [at %]	0	0	0	4	4	4
B [at %]	8	8	8	8	8	8
Al [at %]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Fe	bal.	bal.	bal.	bal.	bal.	bal.
Propriétés magnétiques						
$B_r$ [T]	1,19	1,19	1,08	1,16	1,16	1,04
$H_{c1}$ [kA/m]	875	637	1513	1354	1350	1911
$(BH)_{max}$ [kJ/m <sup>3</sup> ]	258	254	217	248	247	199
$H_{cB}(20\text{ °C})$ [kA/m]	870	620	810	870	870	800
$H_{cB}(180\text{ °C})$ [kA/m]	100	60	230	250	260	490
$dB_r/B_r dT$ [%/K]	-0,12	-0,11	-0,12	-0,12	-0,11	-0,11
Durée de vie						
résine A [jour]	6	6	7	29	41	41
résine B [jour]	8	7	7	32	43	43
résine C [jour]	4	4	6	24	39	40

Figure 1 Propriétés magnétiques et durée de vie des différents aimants étudiés

Composition chimique: le reste sur 100% est du fer (76,5...67,5 at %). Le coefficient thermique  $dB_r/B_r dT$  est défini entre 30 °C et 180 °C. Les tests de corrosion ont été réalisés en autoclave à 115 °C sous pression de 1,75 bar à une humidité relative de 100%.

Il est remarquable de noter que la rémanence n'est que très peu affectée par l'addition de vanadium. En effet la phase  $V_2FeB_2$  n'est pas ajoutée à la microstructure de l'aimant 1, elle ne fait que remplacer la phase  $NdFe_4B_4$  inutile.

La comparaison entre les aimants 4 et 5 montre que lorsque le vanadium est présent, il est possible de substituer au moins 5 at % de Co au Fe sans dégrader les propriétés magnétiques. Cet effet sera utilisé pour améliorer la résistance à la corrosion de ces aimants.

## Dépendance en température des propriétés magnétiques

La figure 2 montre les cycles d'hystérésis des aimants 5 et 6 entre 20 °C et 180 °C; les pertes irréversibles mesurées sur les aimants 1 à 6 sont tracées sur la figure 3: les aimants dopés au vanadium ont une stabilité thermique excellente. A taux de Dy équivalent, ils sont capables de supporter des températures de 50 °C supérieures aux aimants classiques. L'aimant 6 peut par exemple fonctionner à 180 °C sur des droites de travail très basses, jusqu'à  $-B/\mu_0 H = 0,5$ .

Cet effet ne doit pas être attribué à l'augmentation de température de Curie due à la présence de Cobalt. En effet la comparaison des aimants 4 et 5

(figure 3) montre que 5 at % de Co n'ont pas de conséquences sur la stabilité thermique de ces nouveaux aimants.

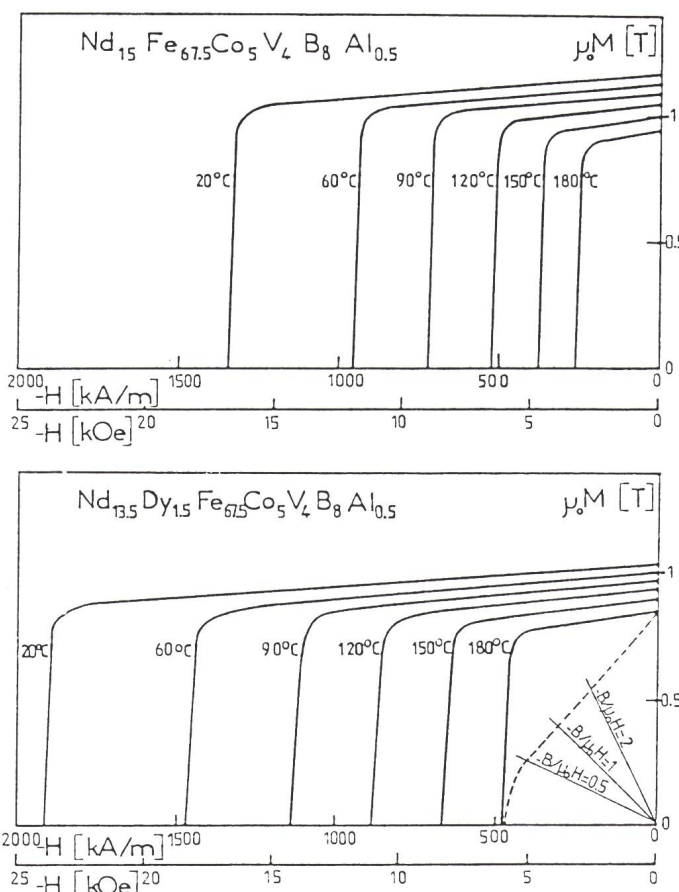


Figure 2 Courbes de désaimantation des aimants 5 et 6 à différentes températures  
En haut aimant 5  
En bas aimant 6

## Résistance à la corrosion

### Propriété intrinsèque: aimants non revêtus

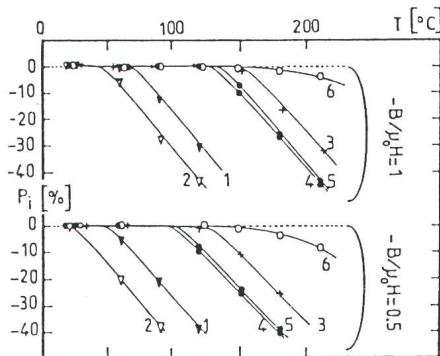
Ainsi que le montre la photographie (figure 4), les aimants sans vanadium non revêtus soumis à un traitement en étuve humide pendant 500 heures se décomposent partiellement. Une analyse en diffraction X de la poudre libérée par ces aimants (figure 5) montre qu'elle est constituée de la phase magnétique principale  $Nd_2Fe_{14}B$  ainsi que d'hydroxyde de néodyme: la corrosion s'est développée à travers la phase riche en terre rare en la transformant en  $Nd(OH)_3$  libérant ainsi les grains magnétiques alors dépourvus de liaisons mécaniques avec le corps de l'aimant. Cette corrosion qui débute en surface, s'accélère exponentiellement (figure 6) à partir d'un temps dépendant de la géométrie de l'aimant (ici 250 heures pour un aimant de diamètre 13 mm et de hauteur 10 mm).

Au contraire les aimants dopés au vanadium se caractérisent par une excellente tenue en corrosion. Dans ce cas la diffusion de l'oxydation est bloquée par le réseau de composés  $V_2FeB_2$  intergranulaires. D'autre part les intermétalliques Nd-Co présents dans la

phase eutectique la stabilisent vis-à-vis de l'oxydation. La résistance à la corrosion se traduit alors par une très bonne tenue mécanique de l'aimant en étuve humide (photographie, figure 4, à droite), ainsi que par une cinétique linéaire de prise de poids réduite, sans accélération (figure 6).

### Résistance à la corrosion des aimants revêtus

Trois types de revêtements organiques ont été appliqués sur les aimants 1...6. La résine A est électrophorétique, les résines B et C sont appliquées sans différence de potentiel. Les aimants revêtus ont été soumis à un test en autoclave. La résistance à la corrosion est quantifiée en terme de durée de vie en suivant l'évolution de l'aspect visuel et de l'adhérence du revêtement (voir figure 1). Les aimants 1...3 présentent des boursoufflures après 4...8 jours de test; le revêtement n'adhère plus révélant un développement de corrosion sous la protection. Les aimants 5 et 6 au contraire sont capables de supporter le test pendant 40 jours environ. La durée de vie est donc multipliée par un facteur supérieur à cinq. Ce résultat est la conséquence di-



**Figure 3 Pertes irréversibles d'aimants en circuit ouvert**

T Température

Pi Pertes irréversibles

Les pertes irréversibles sont indiquées pour les aimants 1 à 6 travaillant à  $-B/\mu_0 H = 1$  et à  $-B/\mu_0 H = 0,5$

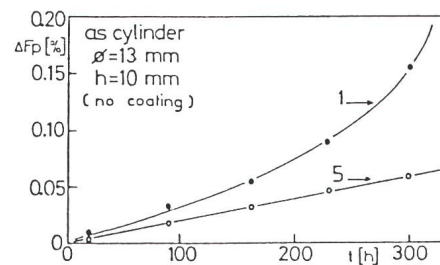
recte de la meilleure tenue de la phase eutectique à l'oxydation.

### Conclusion

La combinaison des additions de vanadium et de cobalt permet d'obtenir des coercitivités intrinsèques de l'ordre de 1350 kA/m. Cet aimant sans Dy est à peu près équivalent ( $B_r$ ,  $H_{ci}$ ) à un aimant classique contenant envi-

ron 0,7 at % Dy, mais sa stabilité thermique et sa résistance à la corrosion sont bien meilleures.

Lorsque 1,5 at % Dy sont de plus substitués au Nd, des températures opératoires de 180 °C sont atteintes, tout en gardant le même avantage de l'excellente tenue en corrosion de cette famille d'aimants. Ce résultat devrait avoir pour conséquence d'ouvrir le marché des moteurs aux aimants Nd(Dy)FeCoVb.



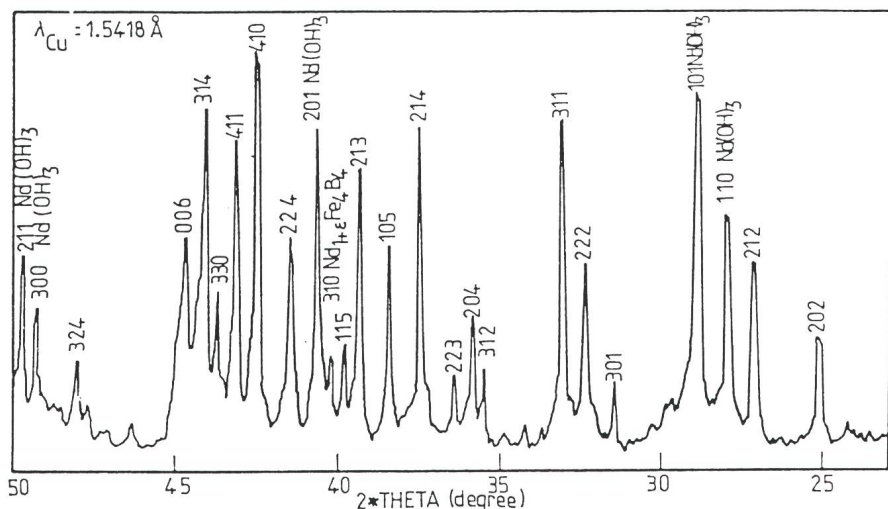
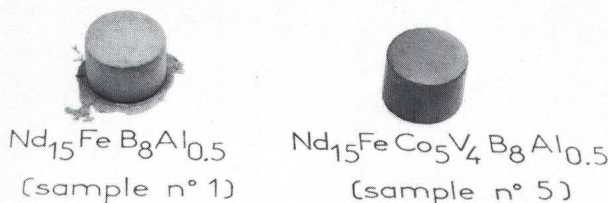
**Figure 6 Prise de poids des aimants 1 et 5 non revêtus en étuve humide**

$\Delta F_p$  Augmentation du poids des aimants en fonction du temps

t temps de test en étuve humide (température: 80 °C; humidité relative: 90%)

Les auteurs tiennent à remercier A. Barzasi, A. Duchêne et N. Berullier pour leur assistance technique ainsi que H. Lemaire et le Centre de Recherches de Péchiney à Voreppe pour leurs discussions bénéfiques.

**Figure 4 Photographie des aimants 1 et 5 non revêtus après un traitement de 500 heures en étuve humide**



**Figure 5 Diagramme de diffraction X obtenu sur la poudre oxydée**

Poudre libérée par l'aimant 1 suite à un traitement de 500 heures en étuve humide

### Bibliographie

- [1] C. Herget: Metallurgical ways to NdFeB alloys. Permanent magnets from Co-reduced NdFeB. Proceedings of the eighth International Workshop on Rare-Earth Magnets and their Applications, May 1985; p. 407...422.
- [2] W. Rodewald: Magnetic properties of sintered Nd-Fe-Al-B magnets. Proceedings of ninth International Workshop on Rare Earth Magnets and their Applications, 31 August...2 September 1987; p. 609...615.
- [3] M. Sagawa a. o.: Permanent magnet materials based on the rare earth-iron-boron tetragonal compounds. IEEE Trans. Magnetics 20(1984)5, p. 1584...1589.
- [4] K. Ohashi a. o.: Corrosion resistance of cobalt containing Nd-Fe-Co-B magnets. Proceedings of the ninth International Workshop on Rare-Earth Magnets and their Applications, 31 August...2 September 1987; p. 355...357.
- [5] R. Grössinger a. o.: The coercivity and anisotropy of (Nd,X)-(Fe,Y)-B (X = Dy, and Y = CoAl) based permanent magnets. Proceedings of the ninth International Workshop on Rare-Earth Magnets and their Applications, 31 August...2 September 1987; p. 593...600.
- [6] Y. Xiao a. o.: Effect of minor alloying substituents (Nb, Ti, Zr) on the temperature dependence of the permanent magnet properties of sintered (Nd, Dy)-(Fe, Co)-B. Proceedings of the ninth International Workshop on Rare-Earth Magnets and their Applications, 31 August...2 September 1987; p. 467...476.
- [7] M. Sagawa, P. Tenaud and F. Vial: High coercivity NdFeB magnets containing vanadium with new microstructure. International Magnetic Conference (Intermag '90) Brighton, April 17...20, 1990; paper DC10.