

Application des aimants aux machines électriques

Bernard Multon

▶ **To cite this version:**

Bernard Multon. Application des aimants aux machines électriques. Doctorat. 35, France. 2010. cel-01246816v2

HAL Id: cel-01246816
https://cel.hal.science/cel-01246816v2

Submitted on 27 Dec 2017

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.

Application des aimants aux machines électriques

Bernard MULTON
Ecole Normale Supérieure de Rennes
Département de Mécatronique

Préambule :
Il s'agit de notes de cours distribuées aux élèves de l'ENS de Cachan (préparation à l'agrégation de Génie Electrique) mais elles pourront être utiles également à ceux de Physique et Electricité Appliquée, des CAPET et CAPES correspondants, des Ecoles d'Ingénieurs où l'on enseigne l'électrotechnique ainsi que les licences et masters du domaine de l'EEA.

Ce document peut comporter des erreurs, je recevrai volontiers des recommandations de correction que vous pouvez m'adresser directement à l'adresse : Bernard.Multon@ens-rennes.fr

---

Sommaire

1- Historique, introduction

2- Modélisation d'un aimant
2.1- Aimants « rigides » (ou durs)
2.2- Aimant dur dans un circuit magnétique. Point de fonctionnement
2.3- Aimants « peu rigides »
2.4- Formulation de l'énergie interne des aimants rigides

3- Caractéristiques des différentes technologies
3.1- Caractéristiques générales des aimants permanents actuels
3.2- Causes de désaimantation irréversible et vieillissement
3.3- Exemples de courbes de caractéristiques B(H) de différentes technologies d'aimants

4- Dimensionnement, applications
4.1- Principe du dimensionnement, critère d'Evershed
4.2- Intérêt des aimants pour les systèmes magnétiques
4.3- Exemples de moteurs ou générateurs
4.4- Quelques aspects du dimensionnement des inducteurs multipolaires
4.5- Exemple de caractéristiques de machines à aimants

5- Bibliographie

6- Remarques sur les unités

1- Historique, introduction

Aimants en **acier au Cobalt** (35% de Cobalt 1921 : 7,2 kJ/m^3) années 20 pour la réalisation de magnétos d'allumage de moteurs à explosion en aéronautique. Les aimants au Cobalt ne nécessitent plus l'ancienne forme de fer à cheval (comme les acier au tungstène et au chrome) car ils résistent bien à la désaimantation.

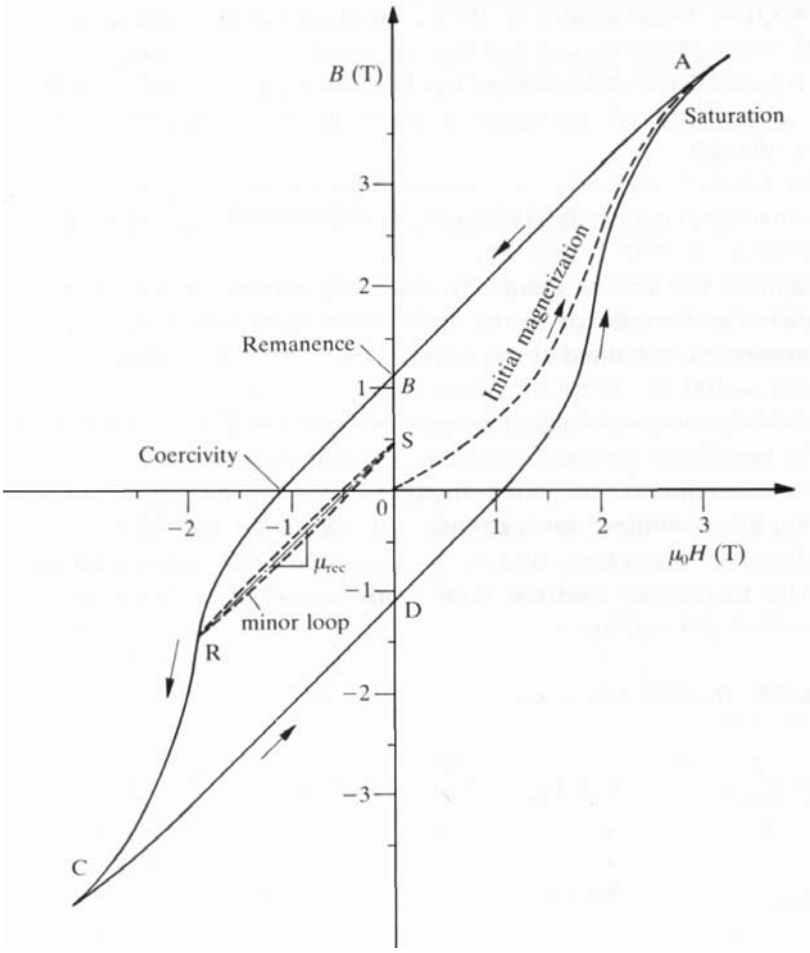
Différentes nuances ont été développées dans les années 30 : Ni-Al (1932, 9,5 kJ/m^3), Ni-Co-Ti (1934, 12,8 kJ/m^3), FePt (1936, 24 kJ/m^3), CoPt (1937, 27 kJ/m^3).
A la fin des années 1930 : développements des AlNiCo aux Bell Laboratories. Des moteurs à aimants de quelques chevaux ont pu être réalisés.
Années 1950 : aimants ferrites durs.
Années 1960 : arrivée des terres rares : SmCo samarium-cobalt.
Années 1980 : nouvelles nuances de terres rares NdFeB (Néodyme Fer Bore).

Les différentes technologies d'aimants sont :
Alnico (ou Ticonal) (spécificité de la droite de recul fonction de l'état antérieur...) : en voie de disparition des applications énergie
Céramiques (ferrites) : les différentes nuances, intérêt du faible coût
Aimants terres rares :
SmCo : différentes nuances, liants plastiques
NdFeB : différentes nuances, liants plastiques, c'est la technologie la plus évolutive...

Cycle B(H) d'un matériau magnétique hystérétique :

Caractéristique générale applicable aux matériaux doux et durs

les matériaux durs ont une rémanence et une coercivité supérieures à celles des matériaux doux dont on attend, au contraire, qu'elles soient les plus faibles possibles.



Source : [Miller_89]

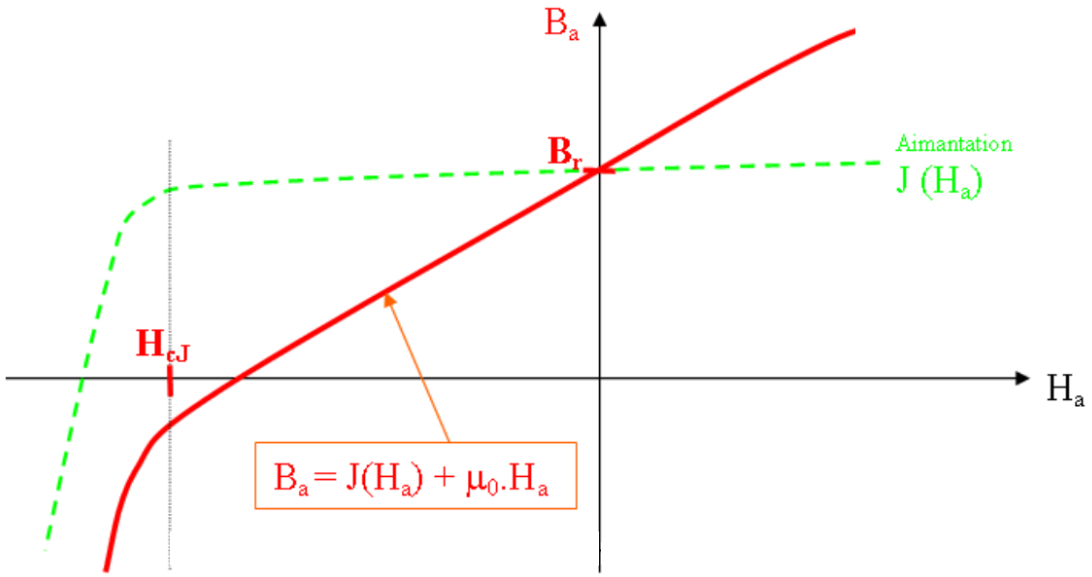
2- Modélisation d'un aimant

2.1-Aimants « rigides » (ou durs)

Une modélisation linéaire (B_r, H_{dem}, μ_a) est bien adaptée aux aimants modernes dit durs ou rigides (hors Alnico).

On considère que de 0 à H_{dem}, **l'aimantation J reste constante** et égale à B_r. Alors, en convention récepteur (magnétique) :

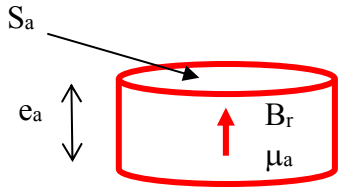
$$B_a = B_r + \mu_a.\mu_o.H_a$$



Dans le cas des aimants durs de type ferrite et terres rares, H_{cb} correspond sensiblement à $B_a = 0$ (perméabilité relative proche de 1), mais il ne s'agit que de la valeur du champ pour laquelle l'induction s'annule. La valeur limite, conduisant à une désaimantation irréversible significative, est bien plus élevée. Elle est notée **H_{cJ}** et correspondant à l'annulation de l'aimantation qu'il ne faut absolument pas atteindre sous peine de désaimantation irréversible. Ce champ est très sensible à la température (voir chapitre 3).

La caractéristiques $B_a(H_a)$ des aimants modernes est alors bien modélisée par une droite (la partie linéaire de la courbe précédente) et on peut utiliser aisément un modèle magnétique avec une force magnétomotrice constante et une réluctance interne qui nous permettra de calculer simplement le flux généré.

Par exemple pour un aimant d'induction rémanente **B_r**, de perméabilité équivalente **μ_a**, de section et d'épaisseur constantes **S_a** et **e_a** :



$$E_a = \frac{B_r}{\mu_a.\mu_0}.e_a \qquad R_a = \frac{1}{\mu_a.\mu_0}.\frac{e_a}{S_a}$$

Bien sûr ce schéma peut être transformé en générateur de Norton avec source de flux ($B_a.S_a$) et réluctance en parallèle. Maintenant, l'aimant est représenté comme un générateur, donc en convention générateur.

Les aimants les plus performants peuvent subir des champs tels que B_a devient très négatif :
Exemple Vacodym 400 (NdFeB) :
à 20°C : Br = 1,05 T B = 0 pour 760 kA/m (perméabilité relative de 1,1)
et, avec la même pente, pour Hcj = 2150 A/m on obtient pour B = -1,9 T !
ce qui donne une excursion possible, en régime de désaimantation (réversible), de près de 3 T, valeur plus significative des performances dans une machine électrique que la simple induction rémanente, car elle permet de prendre en compte le champ de réaction d'induit.

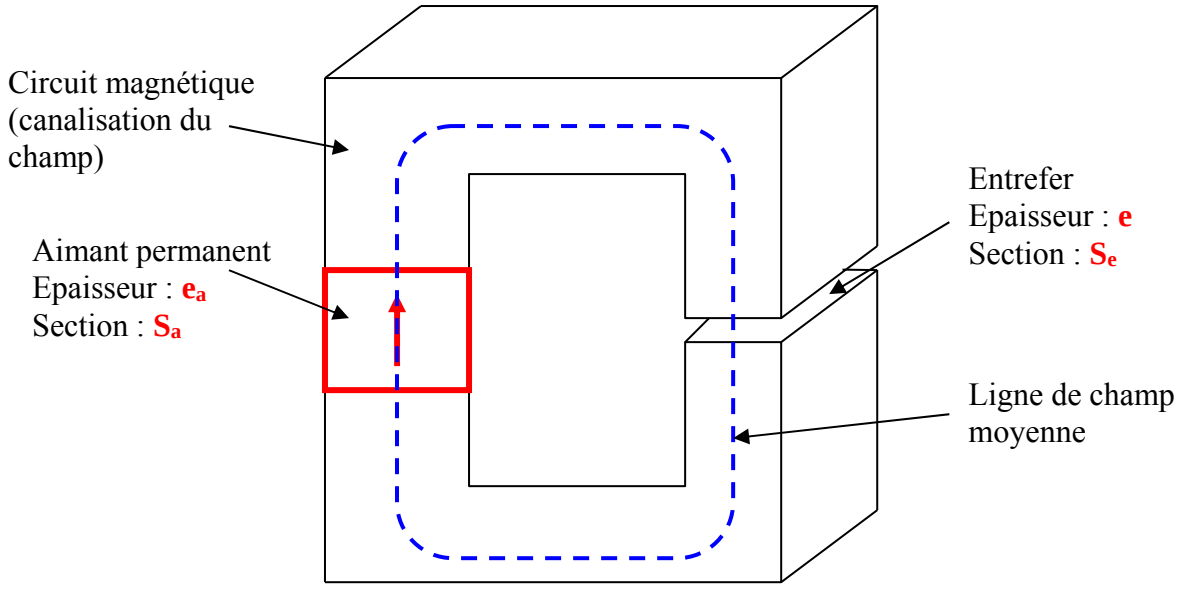
Attention cependant, les caractéristiques des fabricants sont données à 20°C, ce qui ne correspond pas nécessairement à la température d'usage réelle.

2.2- Aimant dur dans un circuit magnétique. Point de fonctionnement

Le cas d'école généralement utilisé est un circuit en fer à cheval, rarement rencontré dans les dispositifs de conversion électromécanique d'énergie, mais suffisamment représentatif de l'ensemble des circuits magnétiques.

Les principales hypothèses effectuées sont :
- pas de fuites : tout le flux qui sort de l'aimant est canalisé vers la zone d'entrefer, supposée être la zone utile
- la circulation du champ dans le fer est négligée devant celle dans l'entrefer (perméabilité infinie et matériau non saturable)

Droite de charge ou d'entrefer et point de fonctionnement



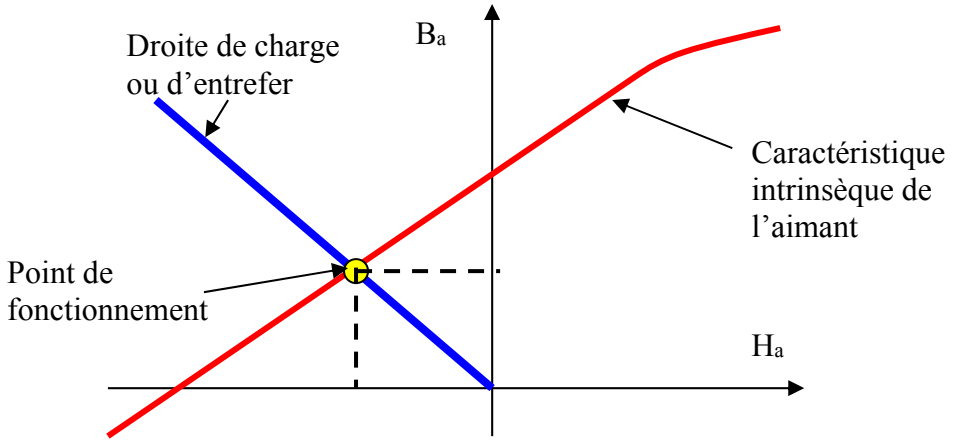
Mise en équation en l'absence de bobinage dans le circuit magnétique
Soient H_a et B_a le champ et l'induction dans l'aimant compte tenu de la configuration magnétique globale et H_e et B_e le champ et l'induction dans l'entrefer.

Théorème d'Ampère : $H_a.e_a + H_e.e = 0$ (car $H_{fer} = 0$)
Avec : $B_e = \mu_0.H_e$
Conservation du flux : $\varphi_a = B_a.S_a = \varphi_e = B_e.S_e$

Il en résulte que : $B_a = B_e.\frac{S_e}{S_a} = \mu_0.H_e.\frac{S_e}{S_a} = -\mu_0.H_a.\frac{e_a}{e}.\frac{S_e}{S_a}$

Cette fonction B_a (H_a), qui dans ce contexte linéaire (non saturable) est une droite, est appelée « droite de charge ».

Son intersection avec la caractéristique intrinsèque B_a (H_a) de l'aimant donne le point de fonctionnement. La représentation graphique est particulièrement intéressante dans les situations non linéaires. En régime linéaire, on pourra utiliser les schémas réluctants tels que celui proposé au §2.1.

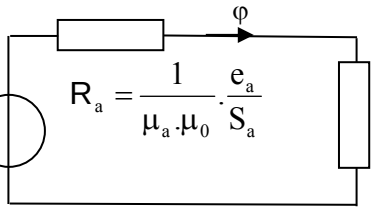


La présence d'un entrefer dans le circuit magnétique contribue à réduire la valeur de l'induction dans l'aimant par rapport à son induction rémanente, d'où l'appellation « charge ». Si l'entrefer varie (effets d'encoches ou réluctance variable avec aimants), la pente de la droite de charge fluctue et fait varier le point de fonctionnement, ce qui peut avoir, entre autres effets, de créer des pertes magnétiques dans l'aimant.

On parle d'aimant en court-circuit magnétique lorsque l'entrefer est nul : alors B_a est égale à B_r. En revanche, dans un circuit ouvert (entrefer infini), la droite de charge est horizontale et B_a est nulle, en réalité, les lignes de champ ne se referment pas à l'infini et la droite de charge équivalente n'est pas horizontale mais seulement très inclinée. Cela peut suffire à désaimanter certains types d'aimants (aimants peu rigides : Alnico). D'où la précaution de non démontage de certains dispositifs à aimants.

Notons que la présence d'un bobinage, entourant le circuit magnétique et alimenté par un courant, conduirait à un décalage horizontal de la droite de charge et contribuerait à réduire ou augmenter le champ selon son signe (voir §4.1).

Dans le cas d'aimants rigides, nous avons vu qu'il était possible d'exploiter le schéma réluctant équivalent du §2.1. Montrons que l'on obtient bien, en régime linéaire et avec les mêmes hypothèses, les mêmes résultats que précédemment (les schémas réluctants résultent de la conservation de flux et du théorème d'Ampère). Nous recommandons cette méthode.



$$E_a = \frac{B_r}{\mu_a.\mu_0}.e_a \qquad R_a = \frac{1}{\mu_a.\mu_0}.\frac{e_a}{S_a} \qquad R_e = \frac{1}{\mu_0}.\frac{e}{S_e}$$

$$\varphi = \frac{E_a}{R_a + R_e} \quad \text{et} \quad B_a = \frac{\varphi}{S_a} \quad \text{et} \quad B_e = \frac{\varphi}{S_e}$$

Donc :

$$B_a = \frac{B_r}{1+\mu_a.\frac{e}{e_a}.\frac{S_a}{S_e}} \text{ (positive car ici l'aimant est en convention générateur) et } B_e = \frac{B_r}{1+\mu_a.\frac{e}{e_a}.\frac{S_a}{S_e}}.\frac{S_a}{S_e}$$

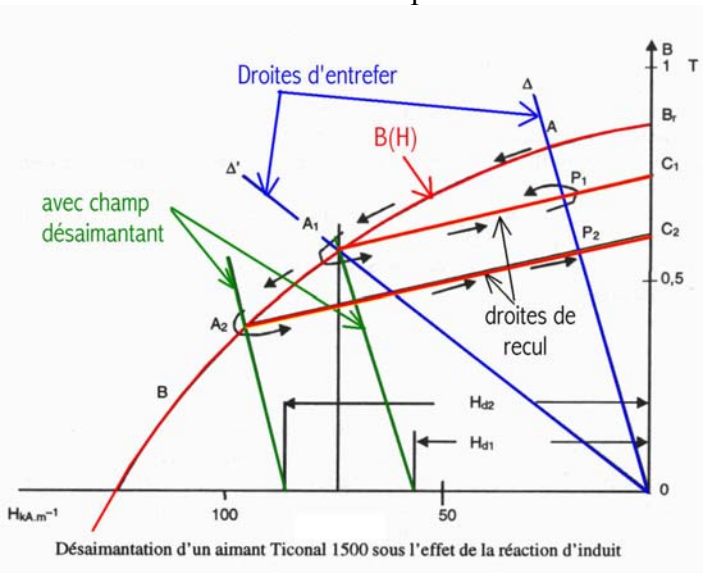
Les deux sous-chapitre suivants (§2.3 et 2.4) sont donnés à titre « encyclopédique ». Mais leur contenu ne doit, à mon avis, être enseigné que dans des formations pointues.

2.3- Aimants « peu rigides »

Il s'agit des aimants d'ancienne génération (Alnico par exemple) très peu utilisés aujourd'hui, sauf dans d'anciennes générations de moteurs (Axem de Parvex, certains moteurs pas à pas hybrides…) ou fonctionnant à haute température (400°C) ou encore dans des appareils de mesure (avantage de la plus faible dérive en température).

Leurs caractéristiques non linéaires et les représentations associées, plus complexes que celles des aimants rigides, sont celles qui sont les plus décrites dans la littérature, car ces aimants ont longtemps régné. Cela contribue d'ailleurs à rendre difficilement accessible leur modélisation (non linéarités, effets hystérétiques…), car elle nécessite notamment des approches de résolution graphique (ou numérique) alors que les aimants rigides, dont la caractéristique est modélisée par une simple droite où les deux paramètres (induction rémanente et champ de désaimantation) dépendant de la température, se prêtent bien aux calculs analytiques dans des schémas réluctants.

Notions de droite de recul et de perméabilité réversible



Désaimantation d'un aimant Ticonal 1500 sous l'effet de la réaction d'induit

Les droites d'entrefer correspondent aux caractéristiques du circuit magnétique externe (voir la littérature courante),
L'intersection avec la caractéristique $B_a(H_a)$ de l'aimant donne le point de fonctionnement.
Plus l'entrefer est élevé (réluctance élevée du CM), plus la droite d'entrefer est inclinée ce qui produit un effet désaimantant.
Lorsque l'on revient en arrière (réluctance diminuant), on ne revient pas sur la caractéristique de première aimantation mais sur une « **droite de recul** ». La pente de cette droite est la perméabilité réversible. *[Livre G. Lacroux]*

Dans le cas des aimants Alnico, le champ désaimantant est relativement faible, si le champ H_a devient trop élevé, l'aimant est partiellement désaimanté (irréversibilité) et sa caractéristique change, B_r est réduit.

2.4- Formulation de l'énergie interne des aimants rigides

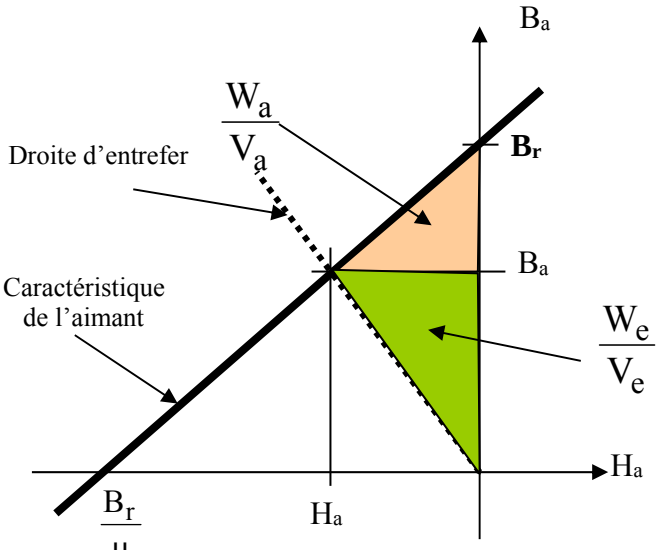
$$W_a = \left[\int_{B_r}^{B_a} H_a.dB_a\right] V_a$$

$$H_a = \frac{B_a - B_r}{\mu} \quad \text{avec} \quad \mu = \mu_a.\mu_o$$

$$\int_{B_r}^{B_a} H_a.dB'_a = \left[\frac{B'^2_a}{2.\mu} - \frac{B_r.B'_a}{\mu}\right]_{B_r}^{B_a} = \frac{[B_r - B_a]^2}{2.\mu}$$

L'énergie stockée dans l'aimant est nulle quand $B_a = B_r$ (aimant en court-circuit magnétique)
et maximale lorsque $B_a = 0$.

$$\frac{W_{aMax}}{V_a} = \frac{B_r^2}{2.\mu}$$



Source: H.C. LOWATT, P.A. WATTERSON, « Energy Stored in Permanent Magnets », IEEE Trans. On Mag., Vol. 35, n°1, jan. 1999, pp.505-507.

Lorsque l'aimant est en court-circuit magnétique, il a transformé toute son énergie magnétique en énergie mécanique en attirant le circuit magnétique. Lorsque l'on extrait le dit circuit magnétique, on doit fournir une énergie mécanique qui est transformée en énergie magnétique accumulée dans l'aimant.

3- Caractéristiques des différentes technologies

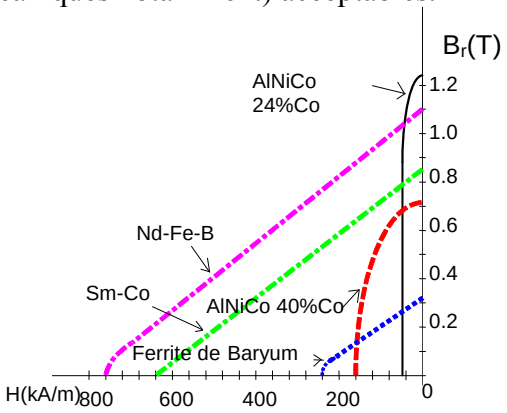
3.1- Caractéristiques générales des aimants permanents actuels, quelques chiffres, BH_{max} correspond à l'énergie maximale utilisable.

type	Date Commer-cialis.	BH_{max} kJ/m³	B_r (T) à 25°C	H_{cJ} kA/m	coeff B %/K	coeff H_{cJ} %/K	T_{max} opération	Prix €/kg	Prix. €/kJ[1] à 20°C
NdFeB	1983	200-400	1 à 1,5	900 à 2000	-0,1	- 0,4 à - 0,6	140 à 220°C	15 à 30 selon nuances	570
$SmCo_5$	1966	140-200	1	2000	-0,04	-0,25	280°C	70	3200
Sm_2Co_{17}	1972	180-240	1,05	2000	- 0,03		350 à 550°C	80	3400
Alnico	1932	50-85	1,1 à 1,3	130	-0,02	+ 0,01	550°C	45 ?	4,5
Ferrites barium		8 à 30	0,2 à 0,4	170	-0,2		100 à 240°C	?	3200
Ferrites strontium	1950	27-35	0,3 à 0,4	250	-0,2	+0,4	250°C	1 à 6	160 à 1400
Ferrites Lanthanium-Cobalt	2005	35 à 40	0,4 à 0,46	360 à 400	- 0,18	< +0,2	100 à 200°C	?	?

[1] *prix €/kJ sur la base du BH_{max} (ce n'est pas nécessairement le meilleur critère) à 20°C.*

Vocabulaire anglo-saxon :
Sintered : fritté
Bonded : lié (généralement liant plastique : polyamide, nylon, epoxy…)
Plastic bonded : à liant plastique
Rubber bonded : à liant caoutchouc

Rq : Attention à ne pas confondre point de Curie (désaimantation totale) et température maximale en opération, définie avec une pertes (réversible) des propriétés magnétiques et des propriétés physiques (mécaniques notamment) acceptables.



source : Exposé F. Alves, LESiR 1998

Les technologies céramiques (ferrites) sont fabriquées à partir de poudre de ferrite de barium ou de strontium comprimée à chaud et sous pression. Les caractéristiques magnétiques peuvent être

améliorées par formage sous champ magnétique intense, on obtient alors des ferrites anisotropes. Le procédé de fabrication par moulage permet d'obtenir aisément une grande variété de formes.

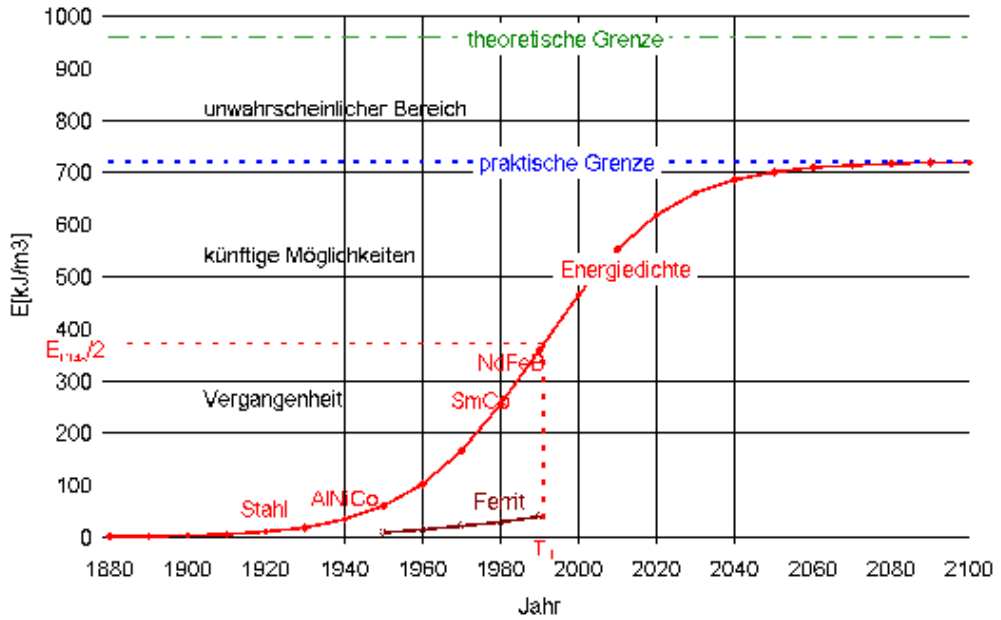
Les technologies "terres-rares" (à base de samarium, puis de néodyme) permettent d'obtenir de très hautes performances en énergie stockée.

Hormis les aimants métalliques AlNiCo (alliage Aluminium, Nickel Cobalt), les autres peuvent être associés à des liants plastiques ou en caoutchouc ce qui permet d'étendre leurs domaines d'application. Leurs températures maximales en utilisation sont en général plus faibles : 80 à 150°C (pour les SmCo).

En considérant toutes les technologies disponibles, de très nombreuses nuances (valeurs de l'induction rémanente comprises entre 0,1 T et 1,5 T) sont possibles.

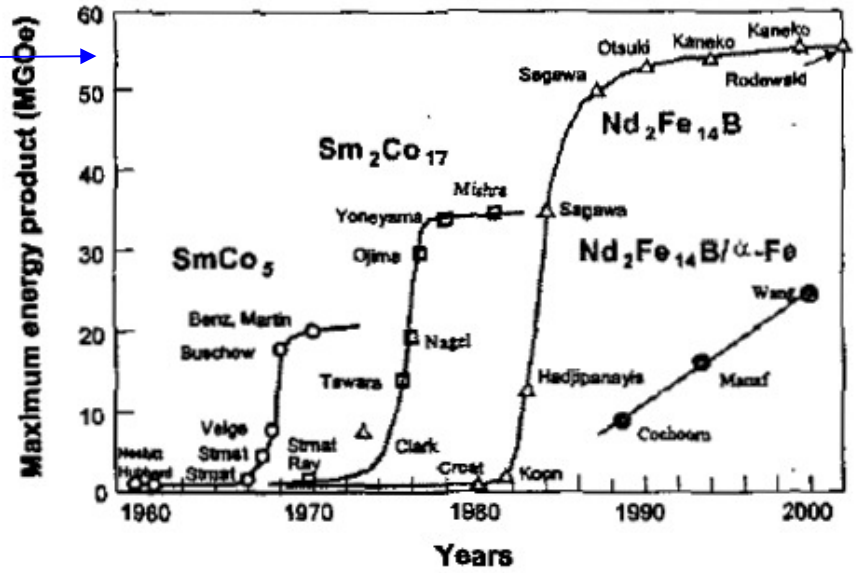
Hormis, le cas des AlNiCo ($\mu r \cong 2{,}5$ à 5), les perméabilités relatives des aimants sont comprises entre 1,05 et 1,4.

Évolution de l'énergie spécifique des aimants (à 20°C) :



Source : Université d'Aachen http://www.iem.rwth-aachen.de/

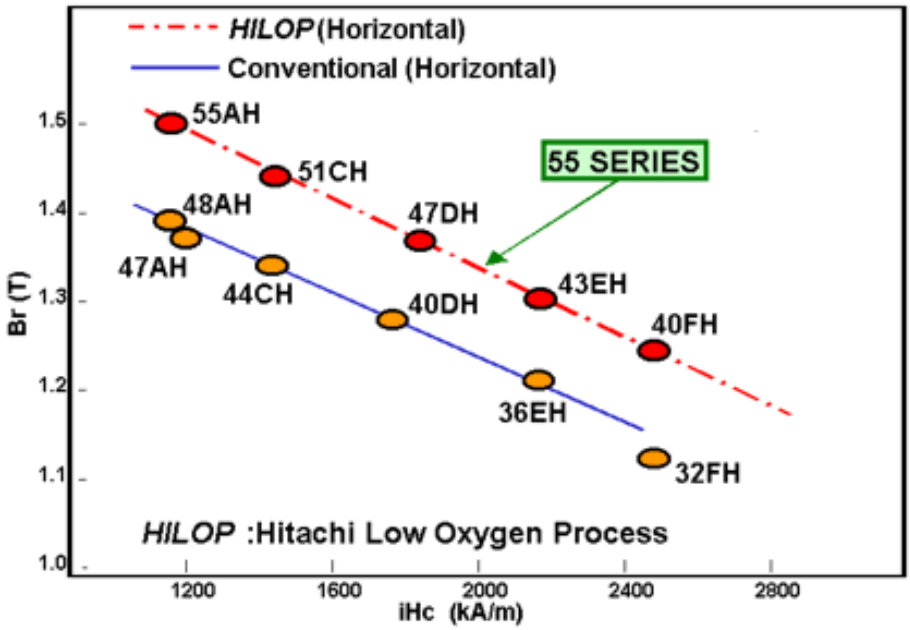
55 MOe/m³ ≅ 440 kJ/m³



Developments in rare-earth magnets over the years
(Prof. S. Liu, University of Dayton)

Source : article de U.S. DESHPANDE, IEMDC 2003 (biblio)

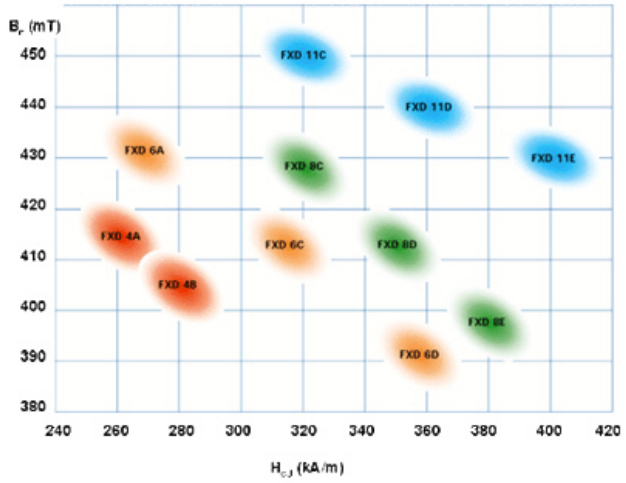
La figure suivante issue d'Hitachi montre la gamme HILOP™(Hitachi Low Oxygen Process) d'aimants NdFeB et le compromis entre induction rémanente et champ limite de désaimantation (attention : valeurs à 25°C) :

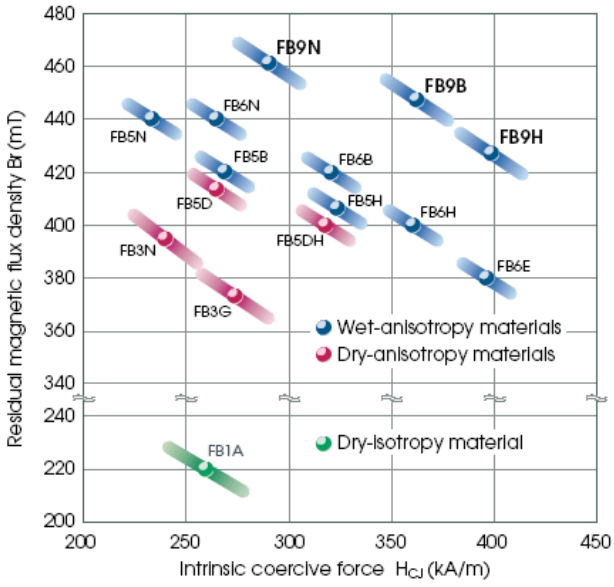


http://www.hitachi-metals.co.jp/

Les ferrites anisotropes ont des performances magnétiques supérieures aux ferrites isotropes.

Depuis les années 2000, les fabricants, comme Ugimag ou TDK, ont obtenu une amélioration significative des performances des ferrites grâce à l'ajout de Lanthanum-Cobalt, l'une des améliorations les plus significatives concerne la réduction de la sensibilité de H_{cJ} aux basses températures (défaut des ferrites). Les deux figures ci-dessous montrent le progrès apporté par cette technologie (séries FXD11 et FB9 respectivement chez UGIMAG et TDK) :

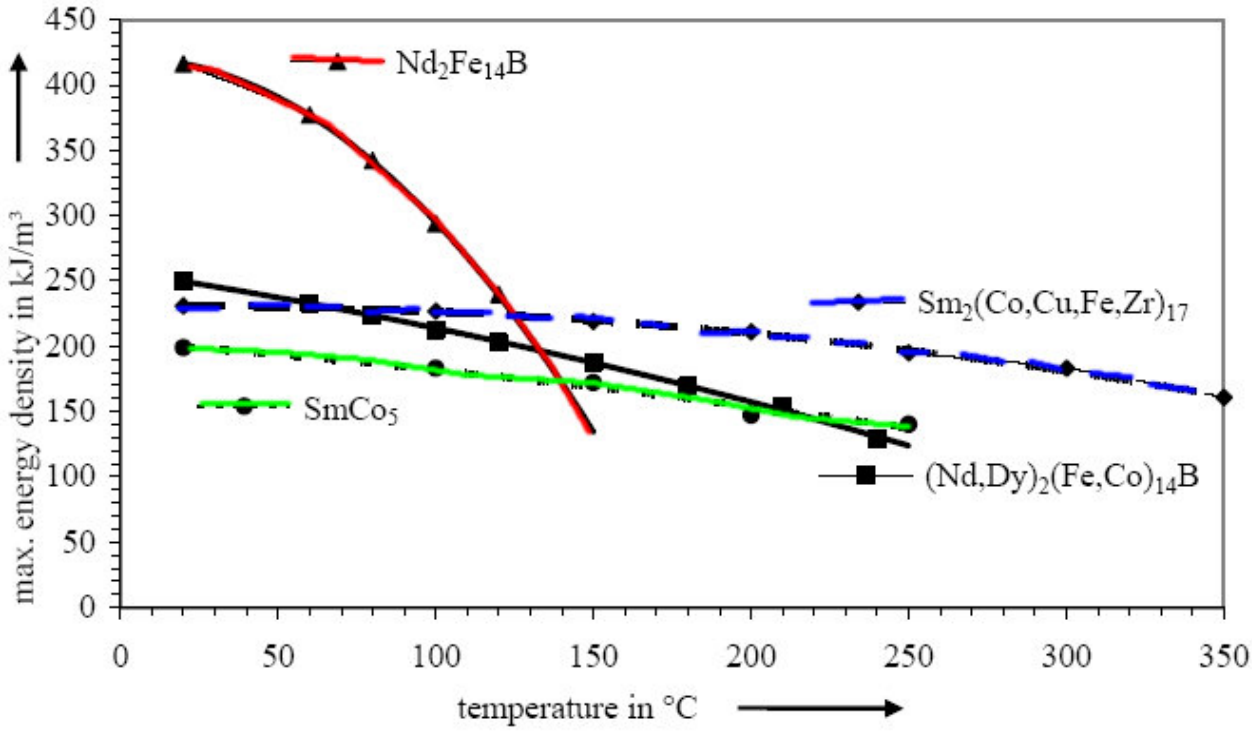




http://carbonelorraine/ugimag.com http://www.tdk.com

Caractéristiques B_r (induction rémanente) et H_{cJ} (champ de désaimantation irréversible) à 20°C

Importance de la température sur le BH_{max} (énergie maximale) des aimants terres rares :
Les caractéristiques des aimants sont normalement spécifiées à 20°C, le comparatif suivant permet de mettre en évidence les plages de température optimales en fonction des technologies d'aimants terres rares :

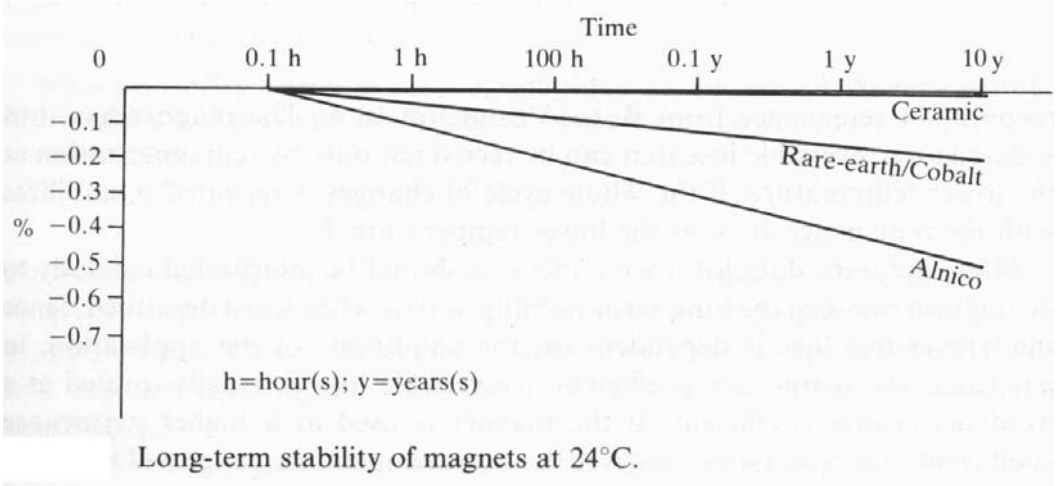


Source : VacuumSchmelze GmbH, W. RODEWALD AND M. KATTER, "Properties and applications of high performance magnets", 2004.

3.2- Causes de désaimantation irréversible et vieillissement

- température excessive, en général, bien avant la température de Curie, on observe des pertes d'aimantation partielles mais non réversibles : on définit ainsi une température limite d'utilisation (variable entre 80 et 350°C selon les nuances) ;
- champ désaimantant excessif : dépassement de Hci. La charge magnétique produit un effet désaimantant, de même un champ opposé produit par une fmm tend à désaimanter l'aimant (réaction d'induit dans une machine électrique). La combinaison des deux ne doit pas conduire, dans les pires conditions, à une désaimantation irréversible.

Vieillissement :

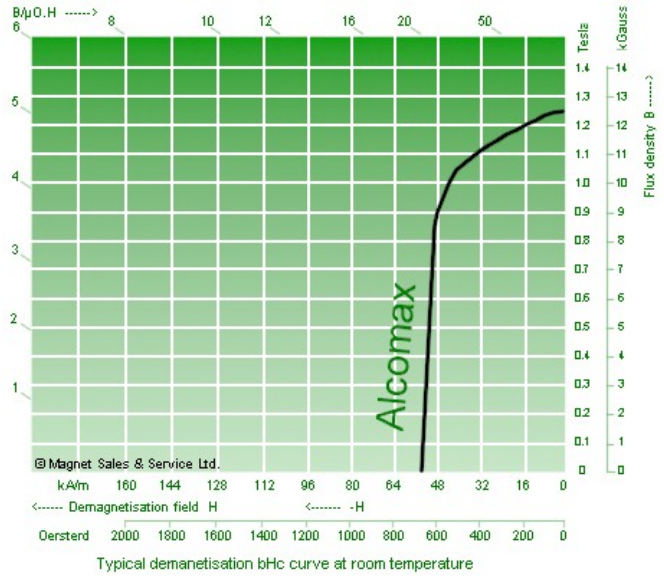


Long-term stability of magnets at 24°C.

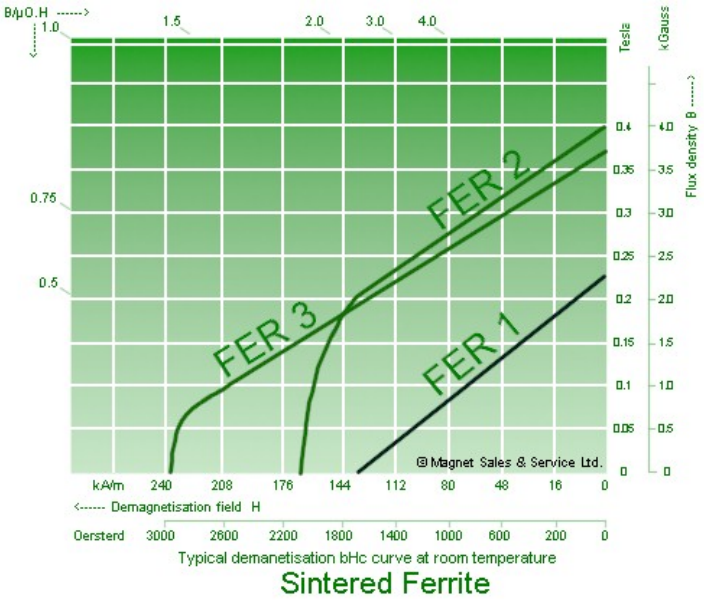
Source : [Miller_89]

3.3- Exemples de caractéristiques de différentes technologies d'aimants

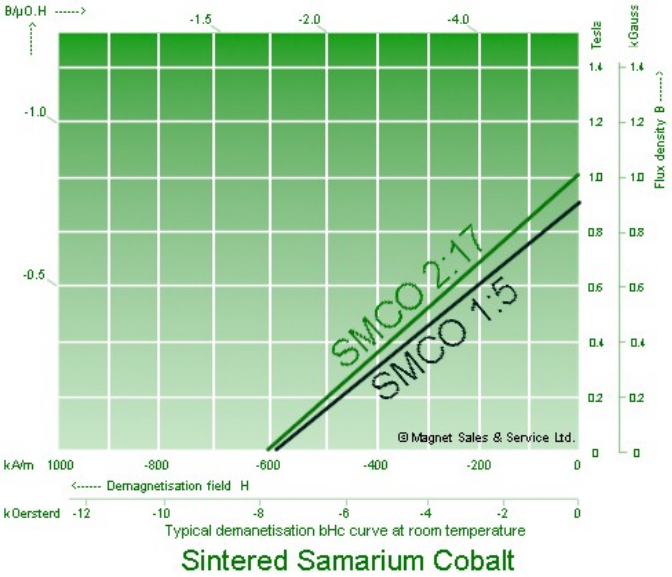
(site web : http://www.magnetsales.co.uk)



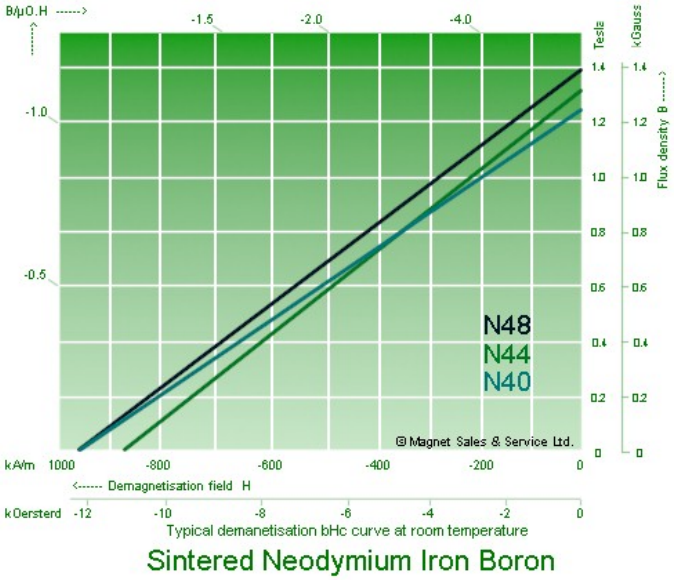
AlNiCo (ou Ticonal en français)



Ferrites frittés



Samarium Cobalt frittés (Sm_2Co_{17} et $SmCo_5$)



NdFeB frittés

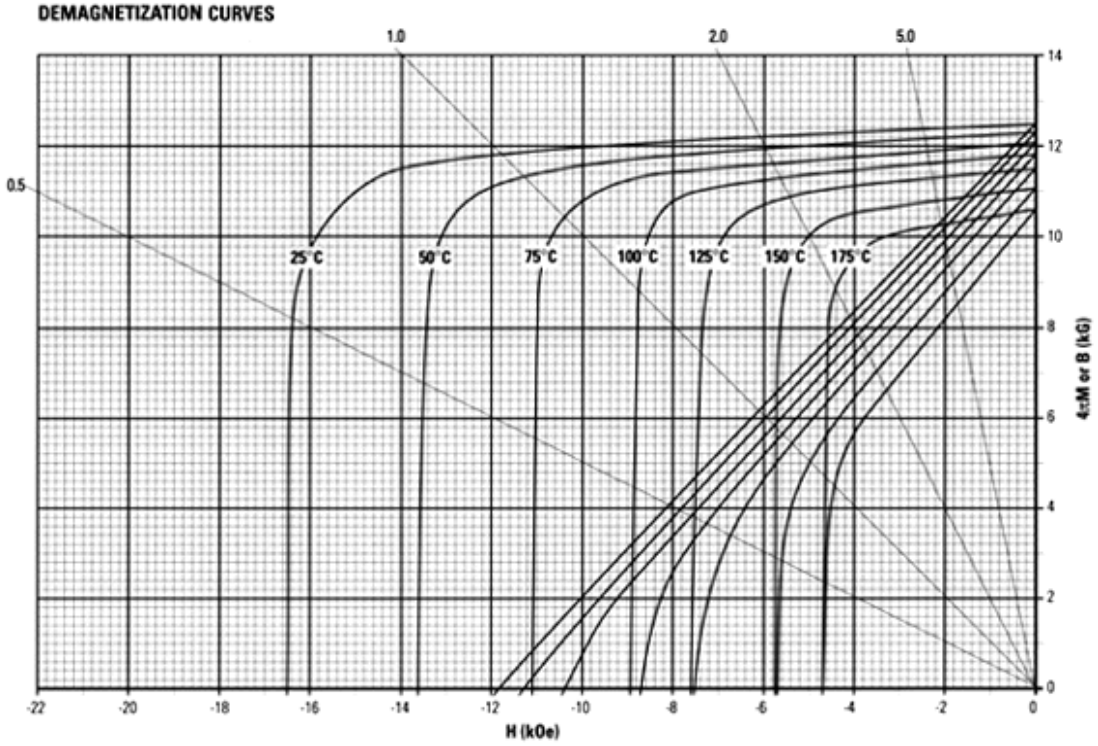
Caractéristiques complètes d'un NdFeB (Magnequench, http://magnequench.com/)

Magnetic Characteristics

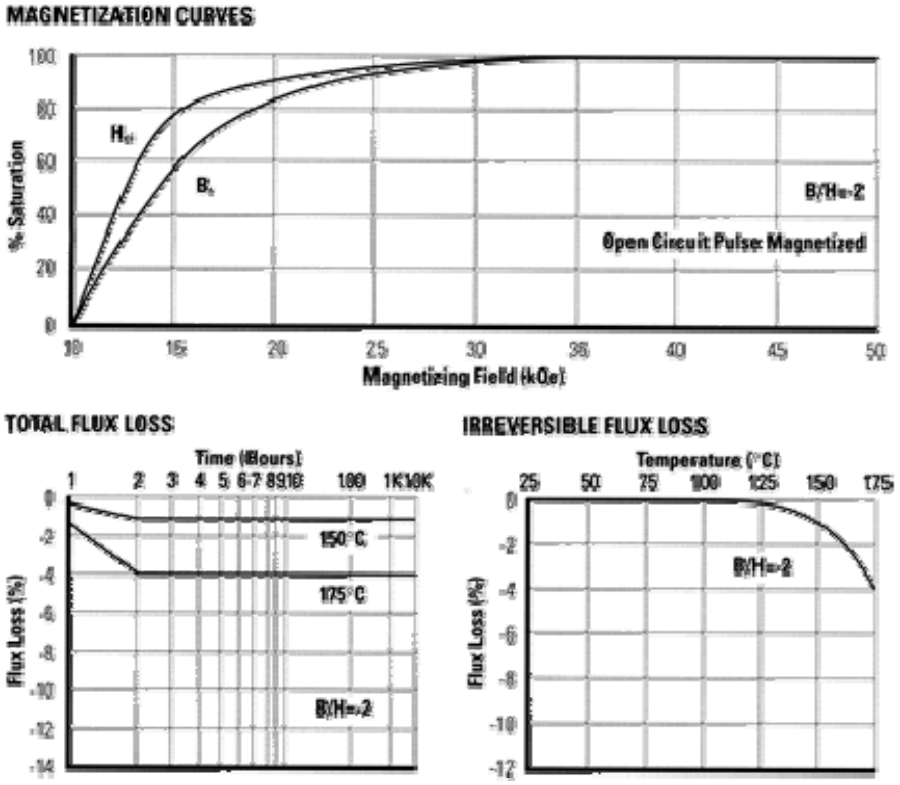
Residual Induction Br	12.5 kG	1.25 Tesla
Coercive Force Hc	11.5 kOe	915 kA/m
Intrinsic Coercivity Hci	16.5 kOe	1313 kA/m
Energy Product (BH)max	36 MGOe	287 kJ/m3
Recoil Permeability mr	1.07	
Temperature Coefficient of Br to 100°C	-0.09%/°C	
Temperature Coefficient of Hcito 100 °C	-0.60%/°C	
Required Magnetizing Force (Open circuit) Hs	35 kOe	2786 kA/m
Maximum Operating Temperature*	180°C	

Physical Properties

Density	7.6 g/cm3
Coefficient of Thermal Expansion|| (25 to 200 °C)	6 mm/m°C
Coefficient of Thermal Expansion (25 to 200 °C)	0.6 mm/m°C
Compressive Strength	5.3 x 103 kg/cm2
Young's Modulus	1.6 x 106 kg/cm2
Poisson Ratio	0.27
Transverse Rupture Strength	1.7 x 103kg/cm2
Hardness	60 Rockwell C
Electrical Resistivity	130 mohm-cm
Specific Heat	0.42 Ws/g°C
Thermal Conductivity	0.07 W/cm°C
Curie Temperature	370 °C



Caractéristiques requises pour l'amantation du matériau et pertes d'aimantation dans le temps et en fonction de la température :



Propriétés Physiques des aimants Terres Rares de Vacuum Schmelze GmbH:

Characteristic properties of VACODYM and VACOMAX at room temperature (20°C)

Material	Curie-temp.	Specific electr. resist-ance	Specific heat	Thermal con-ductivity	Coefficient of thermal expansion 20–100°C		Young's modulus	Bend-ing strength	Com-pressive strength	Vickers-hard-ness	Stress crack resist-ance
	°C	Ω mm²/m	J/(kg · K)	W/(m · K)	∥ c 10^{-6}/K	⊥ c 10^{-6}/K	kN/mm²	N/mm²	N/mm²	HV	K_{IC} N/mm$^{3/2}$
VACODYM 3/5/7XX	ap. 330	1.2–1.6	ap. 440	ap. 9	5	–1	150	ap. 270	ap. 1050	ap. 570	140–180
VACODYM 6XX	ap. 350	1.2–1.6	ap. 440	ap. 9	5	–1	150	ap. 180	ap. 850	ap. 580	90–130
VACOMAX Sm_2Co_{17}	ap. 800	0.75–0.85	ap. 390	ap. 12	10	12	150	90–150	ap. 650	ap. 640	40–50
VACOMAX $SmCo_5$	ap. 720	0.5–0.6	ap. 370	ap. 10	7	13	110	ap. 120	ap. 1000	ap. 550	50–70

Il existe de très nombreuses nuances ou grades.
Dans le cas des NdFeB, les appellations tendent à se standardiser, la dénomination est la suivante : NXXyy où N = NdFeB, XX = énergie maximale à 25°C en MGOe (voir chapitre 6 pour les équivalences) et yy = température maximale en opération.

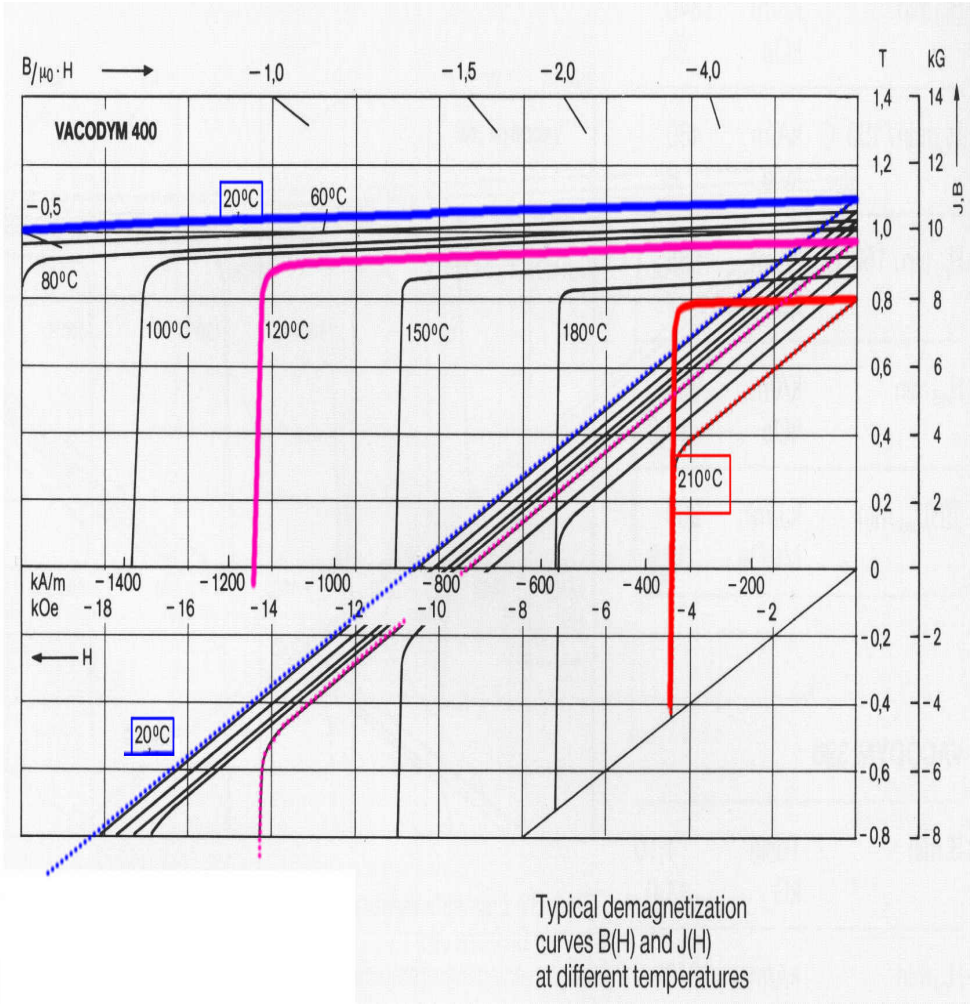
yy : rien : 80°C
M: 100°C
H : 120°C
SH : 150°C
UH : 180°C
EH : 200°C
VH : 220°C

Par exemple : le grade N40H correspond à une nuance de 40 MGOe (ou 320 kJ/m^3) à 25°C, capable de résister à des températures jusqu'à 120°C.

Exemple d'un NdFeB parmi les plus performants (notamment sur le plan de la désaimantation) :
(Vaccum Schmelze) NdFeB Vacodym 400R (1,1 T, H_{cj} : 2150 kA/m à 20°C)

VACODYM 400 HR

B_r min	Tesla	1,10
	kG	11,0
H_{cJ} min	kA/m	2150
	kOe	27
H_{cJ} min / 150 °C	kA/m	720
	kOe	9
H_{cJ} typ / 150 °C	kA/m	835
	kOe	10,5
H_{cB} min	kA/m	820
	kOe	10,3
$(BH)_{max}$ min	kJ/m³	225
	MGOe	28



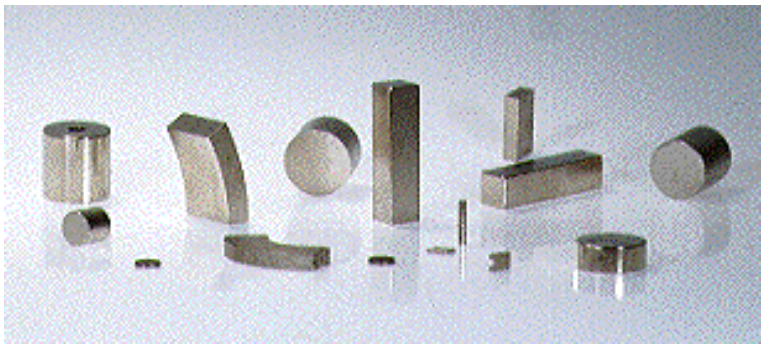
Typical demagnetization curves B(H) and J(H) at different temperatures

Un champ désaimantant de 2150 A/m correspond avec une perméabilité relative de 1,04 environ à une excursion totale d'induction de – 2,8 T à 20°C entre le fonctionnement en court-circuit (flux maximal de l'aimant) et la limite de désaimantation. Notons que cette excursion tombe à 1,26 T (0,45 T 350 kA/m) à 210°C.

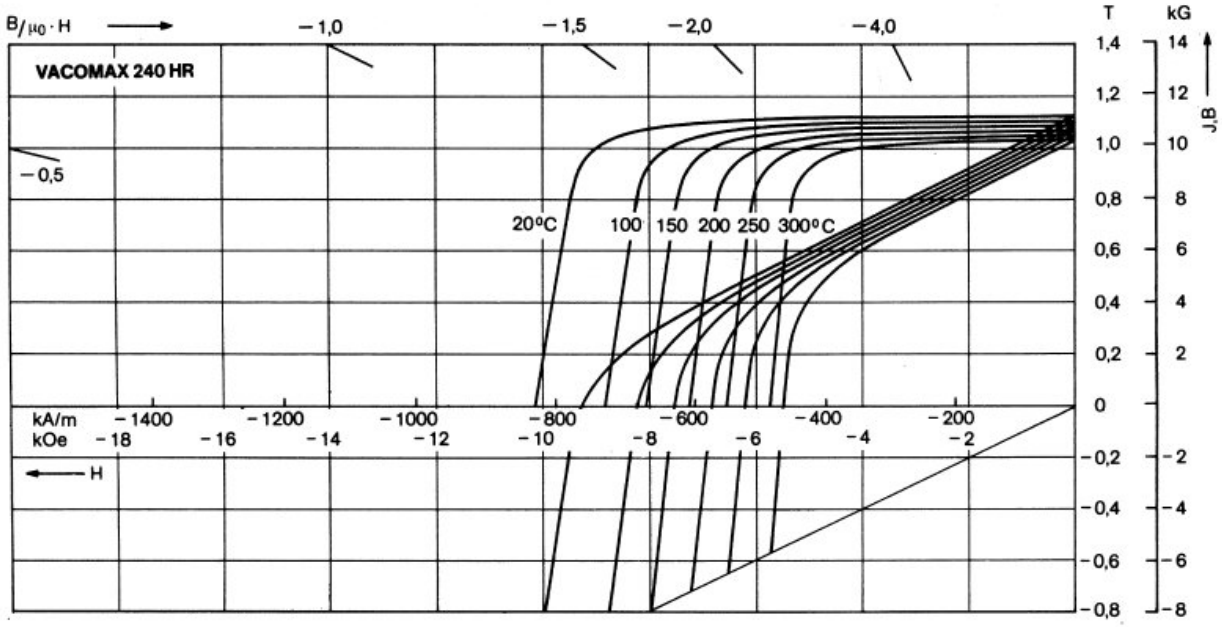
Gamme NdFeB de Vacuum Schmelze (gamme Vacodym)

material	remanence		coercivity				energy density		max. continuous temperature
material code	Br typ Tesla kG	Br min Tesla kG	H_{cB} typ kA/m kOe	H_{cB} min kA/m kOe	H_{cJ} typ kA/m kOe	H_{cJ} min kA/m kOe	$(BH)_{max}$ typ KJ/m³ MGOe	$(BH)_{max}$ min KJ/m³ MGOe	Tmax °C °F
VACODYM 722 HR 380 / 87,5	1,47 14,7	1,42 14,2	915 11,5	835 10,5	955 12	875 11	415 53	380 48	50 120
VACODYM 745 HR 370 / 111,5	1,44 14,4	1,40 14,0	1115 14	1065 13,4	1195 15	1115 14	400 50	370 47	70 160
VACODYM 510 HR 360 / 95,5	1,41 14,1	1,38 13,8	980 12,3	915 11,5	1035 13	955 12	385 48	360 45	70 160
VACODYM 335 HR 315 / 127,5	1,30 13,0	1,23 12,3	980 12,3	765 9,6	1035 13	795 10	325 41	285 36	70 160
VACODYM 633 HR 285 / 79,5	1,35 13,5	1,29 12,9	1040 13,1	980 12,3	1430 18	1275 16	350 44	315 40	110 230
VACODYM 655 HR 280 / 167	1,28 12,8	1,22 12,2	990 12,4	925 11,6	1830 23	1670 21	315 40	280 35	150 300
VACODYM 677 HR 240 / 223	1,18 11,8	1,12 11,2	915 11,5	850 10,7	2465 31	2230 28	270 34	240 30	190 370
VACODYM 722 TP 365 / 87,5	1,43 14,3	1,39 13,9	915 11,5	835 10,5	955 12	875 11	395 50	365 46	50 120
VACODYM 745 TP 355 / 111,5	1,41 14,1	1,37 13,7	1090 13,7	1035 13	1195 15	1115 14	385 48	355 45	70 160
VACODYM 510 TP 345 / 103,5	1,39 13,9	1,35 13,5	1040 13,1	965 12,1	1115 14	1035 13	375 47	345 43	70 160
VACODYM 521 TP 340 / 111,5	1,38 13,8	1,34 13,4	1065 13,4	1005 12,6	1195 15	1115 14	370 46	340 43	80 180
VACODYM 362 TP 305 / 127,5	1,30 13,0	1,25 12,5	1005 12,6	950 11,9	1355 17	1195 15	325 41	295 37	100 210
VACODYM 335 TP 295 / 119,5	1,25 12,5	1,20 12,0	965 12,1	795 10,0	1195 15	955 12	300 38	275 34	70 160
VACODYM 633 TP 280 / 167	1,32 13,2	1,28 12,8	1020 12,8	970 12,2	1430 18	1275 16	335 42	305 39	110 230
VACODYM 655 TP 275 / 95,5	1,26 12,6	1,22 12,2	970 12,2	925 11,6	1910 24	1670 21	305 39	280 35	150 300
VACODYM 677 TP 240 / 223	1,18 11,8	1,13 11,3	915 11,5	860 10,8	2465 31	2230 28	270 34	240 30	190 370
VACODYM 688 TP 225 / 262,5	1,14 11,4	1,09 10,9	885 11,1	830 10,4	2865 36	2625 33	250 32	225 28	220 430
VACODYM 510 AP 315 / 103,5	1,32 13,2	1,30 13,0	965 12,1	900 11,3	1115 14	1035 13	335 42	315 40	80 180
VACODYM 521 AP 305 / 111,5	1,30 13,0	1,28 12,8	995 12,5	955 12	1195 15	1115 14	325 41	305 39	90 190
VACODYM 362 AP 280 / 135,5	1,23 12,3	1,18 11,8	930 11,7	860 10,8	1355 17	1195 15	290 36	260 33	110 230
VACODYM 335 AP 260 / 119,5	1,22 12,2	1,14 11,4	900 11,3	740 9,3	1195 15	955 12	285 36	245 31	80 180
VACODYM 633 AP 245 / 95,5	1,26 12,6	1,22 12,2	965 12,1	915 11,5	1510 19	1355 17	305 38	280 35	120 250
VACODYM 655 AP 255 / 167	1,20 12,0	1,16 11,6	915 11,5	865 10,9	1910 24	1670 21	275 35	255 32	160 320
VACODYM 677 AP 215 / 223	1,13 11,3	1,08 10,8	860 10,8	805 10,1	2465 31	2230 28	240 30	215 27	200 390
VACODYM 688 AP 200 / 262,5	1,08 10,8	1,03 10,3	830 10,4	770 9,7	2865 36	2625 33	225 28	200 25	230 440

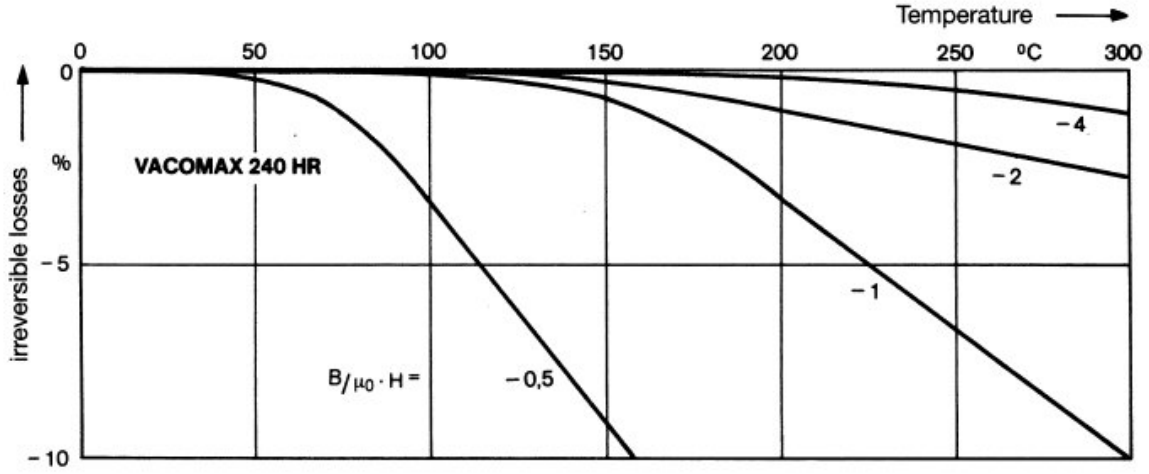
Images d'aimants terres-rares :



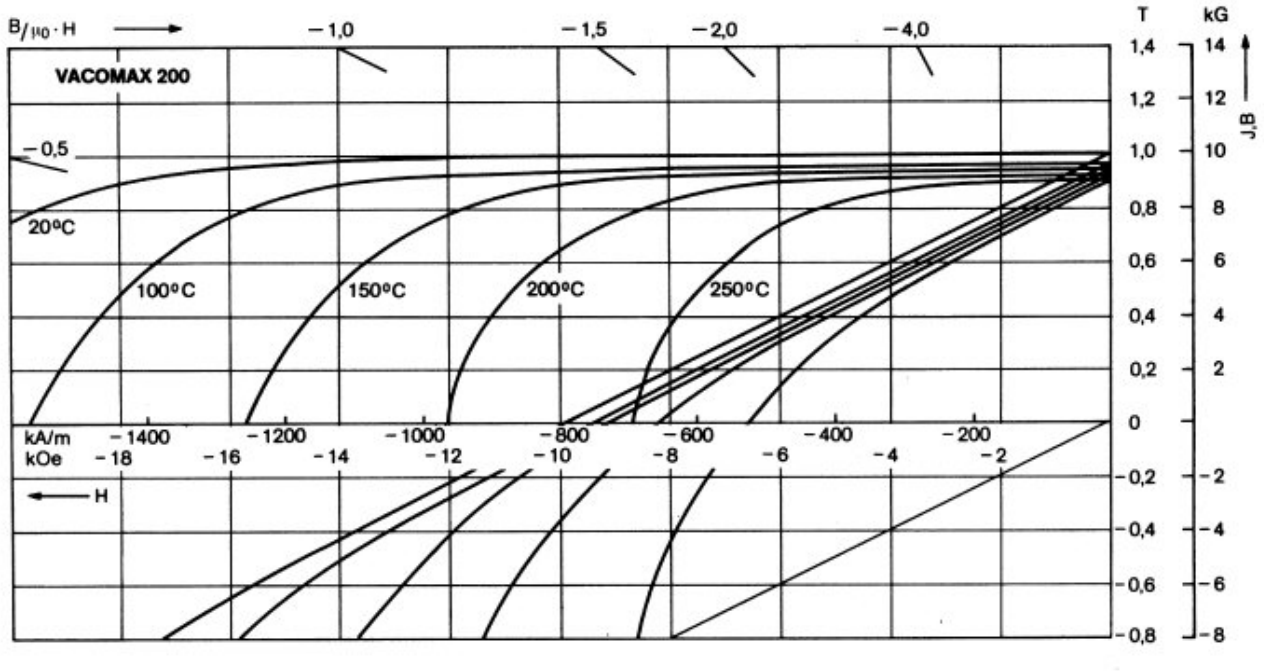
Caractéristiques d'un Sm_2Co_{17} (VACOMAX 240 HR de Vacuum Schmelze)



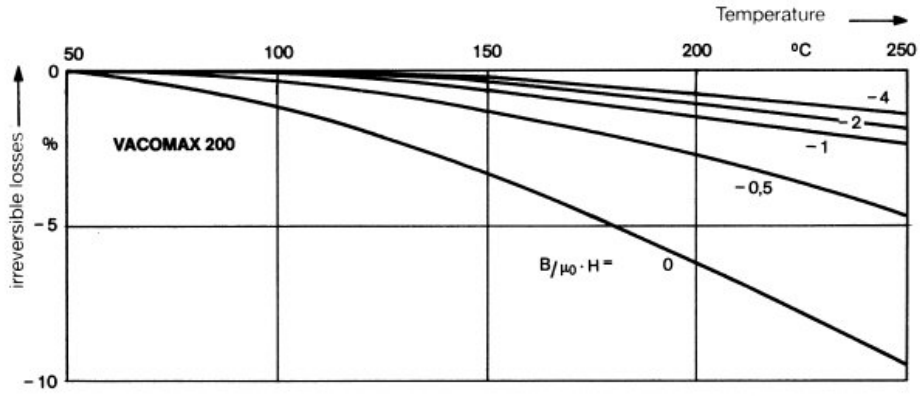
et ses caractéristiques de désaimantation irréversible (combinaison champ – température) :



Caractéristiques d'un $SmCo_5$ (VACOMAX 200 de Vacuum Schmelze)



et ses caractéristiques de désaimantation irréversible (combinaison champ – température) :



Le tableau suivant donne les principales caractéristiques des nuances VACOMAX, on notera que les coefficients de dérives en température croissent aux températures élevées :

	Energy density				Temperature coefficient 20-100°C		20-150°C		Density	Magnetization field strength		Max. continuous temperature	
	$(BH)_{max}$ nom. kJ/m³	MGOe	$(BH)_{max}$ min. kJ/m³	MGOe	$TC(B_r)$ nom. %/°C	$TC(H_{cJ})$ nom. %/°C	$TC(B_r)$ nom. %/°C	$TC(H_{cJ})$ nom. %/°C	ϱ nom. g/cm³	H_{mag} kA/m	kOe	T_{max} [2] °C	°F
Sm2Co17	240	30	200	25	−0.030	−0.15	−0.035	−0.16	8.4	2000	25	300	572
	225	28	190	24	−0.030	−0.18	−0.035	−0.19	8.4	3650	46	350	662
	210	26	180	23	−0.030	−0.15	−0.035	−0.16	8.4	2000	25	300	572
	205	26	170	21	−0.030	−0.18	−0.035	−0.19	8.4	3650	46	350	662
SmCo5	200	25	180	23	−0.040	−0.24	−0.045	−0.25	8.4	2000	25	250	482
	180	23	160	20	−0.040	−0.21	−0.045	−0.22	8.4	2000	25	250	482
	160	20	140	18	−0.040	−0.14	−0.045	−0.15	8.4	2000	25	250	482

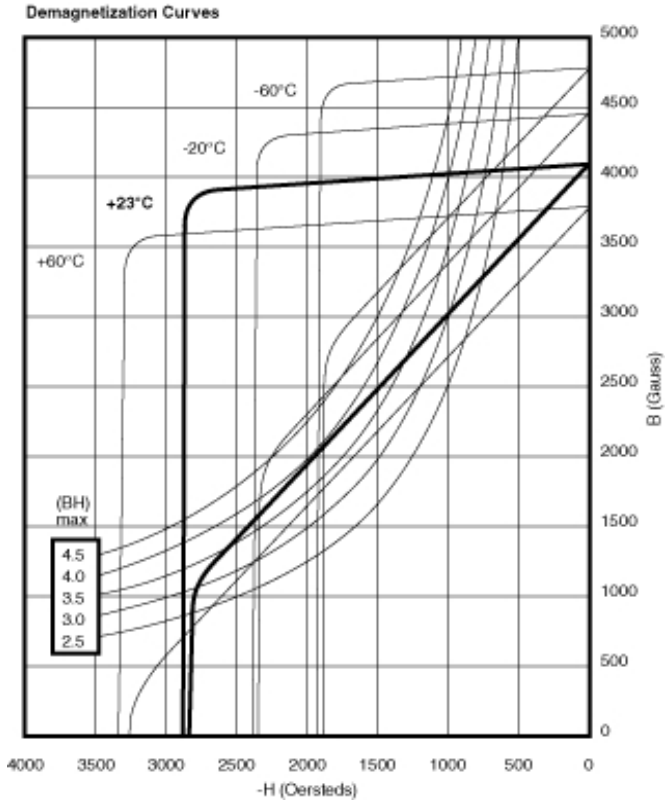
[2]) Users are recommended to consult VAC on any application of VACOMAX inolving temperatures above 150°C.

Caractéristiques complètes d'un ferrite (Strontium)

(General Magnetic Genox 8H, http://www.genmag.com)

Material Characteristics	unités	Typical	Minimum
Residual Induction (B_r)	Tesla	0.4100	0.3895
Coercive Force (H_c)	kA/m	227	203
Intrinsic Coercive Force (H_{cJ})	kA/m	231	207
Max. Energy Product (BH_{max})	kJ/m³	31	28

Material Composition	unités	Strontium Ferrite
Material Density	g/cm³	4.85
Curie Temperature	° C	450
Recommended Magnetizing Force	kA/m	796
Temperature Coefficient for B,	% / ° C	-0.20
Temperature Coefficient for H,	% / ° C	**+ 0.40**



On notera cette particularité importante : le champ coercitif a un coefficient de température positif : c'est à froid que le risque de désaimantation est maximal (cas rencontré sur certains démarreurs d'automobile).

Enfin, les ferrites ont une résistivité électrique élevée qui réduit considérablement les courants induits et les pertes occasionnées par d'éventuelles variation du champ dans les aimants (effets d'encoches par exemple).

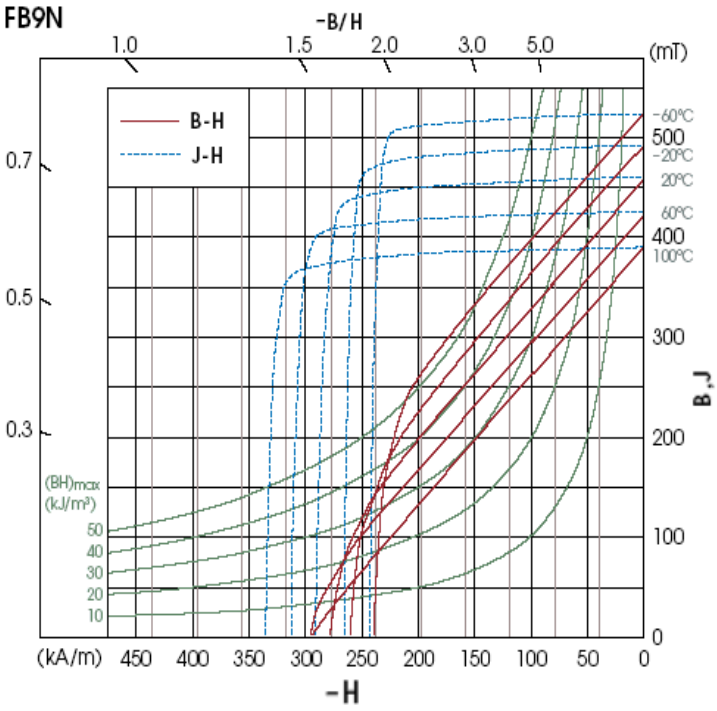


Images d'aimants ferrites :

(images prises sur le site : http://www.magnets-magnets.com/)

Exemple d'un ferrite des plus performants (TDK FB9N) au La-Co (lanthanum-cobalt) :

$B_r = 0{,}46$ T $H_{cJ} = 386$ kA/m coefficient de température de $H_{cJ} < +0{,}2\%/°C$



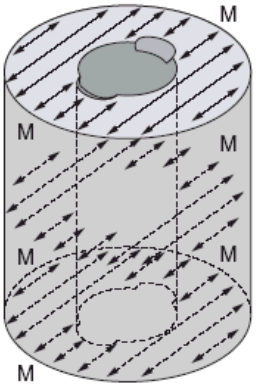
Material name		FB9N
Residual magnetic flux density Br	(mT)	460±10
Coercive force H_{cB}	(kA/m)	278.5±11.9
Intrinsic coercive force H_{cJ}	(kA/m)	386.5±11.9
Maximum energy product (BH)max	(kJ/m³)	40.4±16
Temperature coefficient of Br ⊿Br/Br/⊿T	(%/K)	−0.18
Curie temperature Tc	(K)	733
Thermal expansion coefficient	(1/K) C//*	15×10^{-6}
	C⊥**	10×10^{-6}
Specific heat	(J/kgK)	837
Density	(kg/m³)	5.0 to 5.1 × 10^3
Flexural strength	(N/m²)	0.5 to 0.9 × 10^8
Compressive strength	(N/m²)	> 6.9 × 10^8
Tensile strength	(N/m²)	0.2 to 0.5 × 10^8

* C// : Measurement value in the direction of easy magnetization
** C⊥ : Measurement value in the direction perpendicular to the direction of easy magnetization

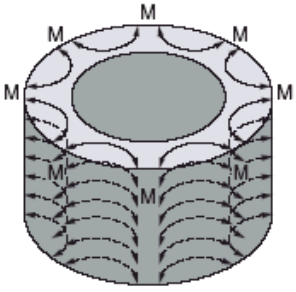
Quelques formes adaptées aux machines électriques :

Shape	Shape's code	Main applications	Advantages over wet-molded magnets
	C	Optical pick-up drive motors for CD-ROM, MD and DVD Spindle motors for CD-ROM, MD and DVD Zooming and focusing motors for camera Vibrating motors for telephone pager	
	DH	Clamping applications for CD-ROM, MD and DVD Hybrid stepping motors	It is easy to mold small magnets that cannot be made by wet molding as well as small shapes that until now had to rely on cutting or slicing.

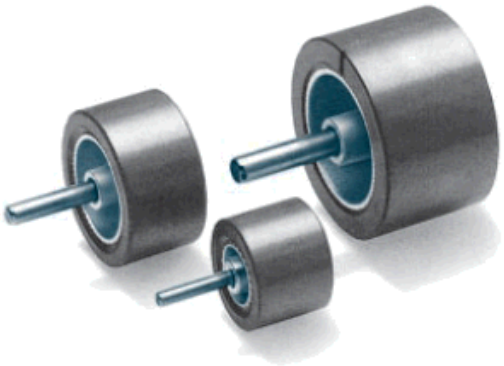
Aimants multipolaires anisotropiques :



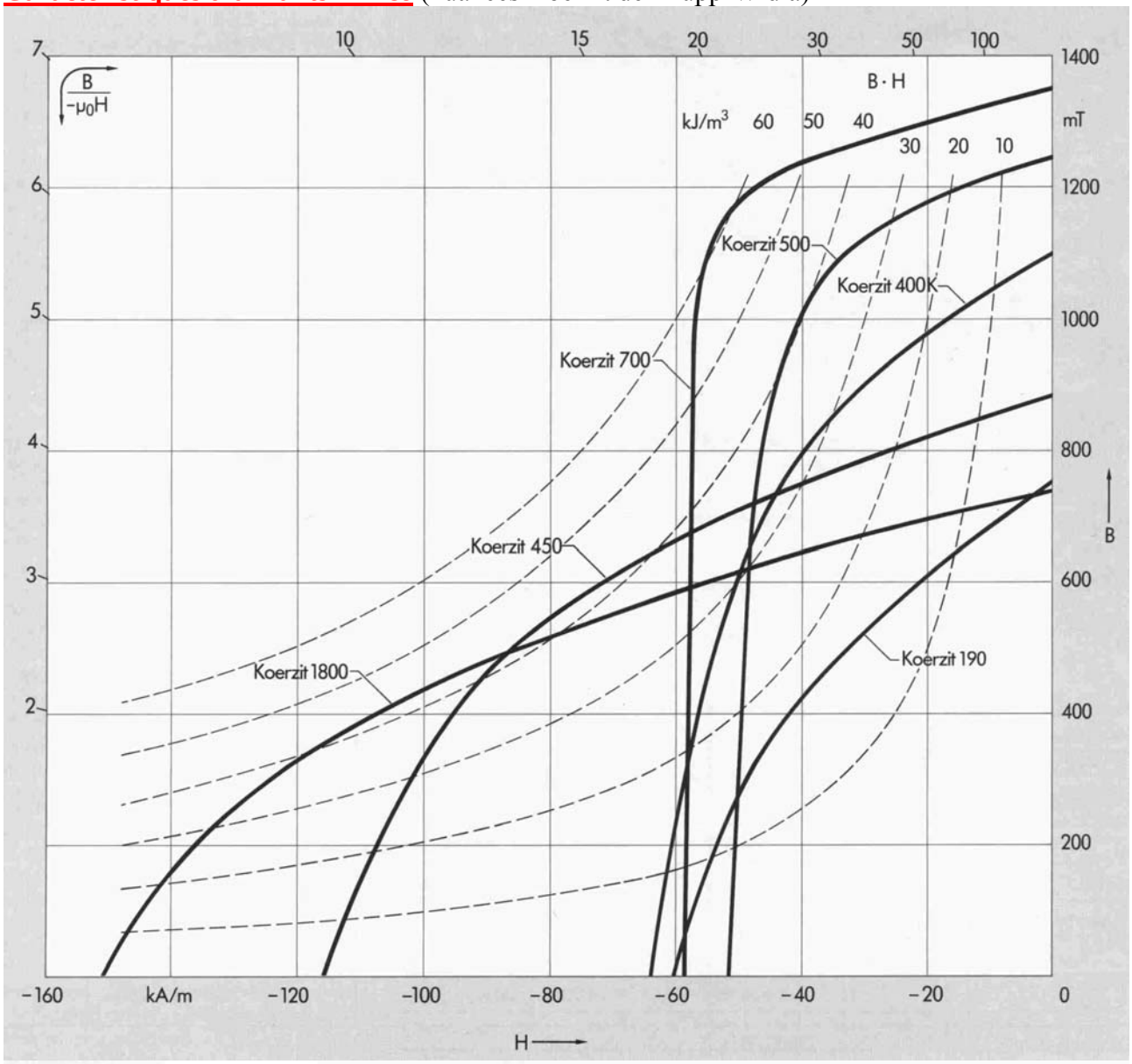
2 pôles



8 pôles

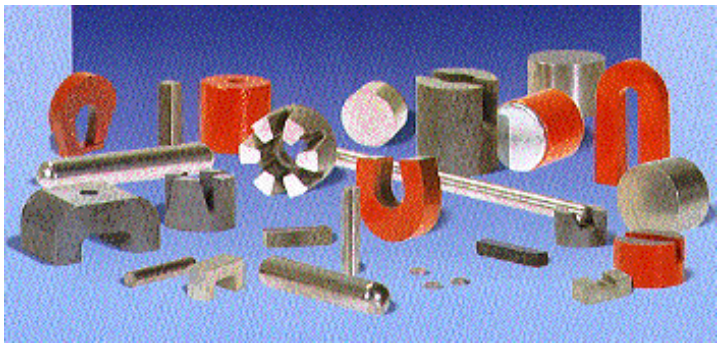


Caractéristiques d'aimants Alnico (nuances Koerzit de Krupp-Widia)



Matériau Nuance	Abréviation	1)	Valeurs typiques / Valeurs minimales: Produit $(BH)_{max}$ kJ/m³	MGOe	Rémanence B_r mT	G	Coercitivité de l'induction magnétique H_{cB} kA/m	Oe	Coercitivité de la polarisation magnétique H_{cJ} kA/m	Oe	Point de fonctionnement optimal: Induction B_A mT	G	Intensité de champ H_A kA/m	Oe	Perméabilité permanente relative μ_p	Intensité de champ d'aimantation H_s kA/m	Masse volumique g/cm³
Koerzit 120	AlNiCo 8/5	i	9,6	1,2	530	5300	52	650	54	680	320	3200	29	370	4,0-5,0	200	6,8
			8,0	1,0	510	5100	48	600	50	630							
Koerzit 130 K	**AlNiCo 9/5**	i	10,3	1,3	550	5500	54	680	57	720	320	3200	32	400	3,5-4,5	240	6,9
			8,8	1,1	520	5200	51	640	54	680							
Koerzit 160	**AlNiCo 12/6**	i	13,5	1,7	650	6500	57	720	60	760	380	3800	35	440	4,0-5,5	240	7,1
			11,9	1,5	610	6100	53	670	57	710							
Koerzit 260	AlNiCo 19/11	i	22,3	2,8	640	6400	105	1320	114	1430	360	3600	62	780	2,5-4,0	400	7,3
			19,1	2,4	590	5900	100	1250	107	1350							
Koerzit 190	AlNiCo 15/6	a	16,7	2,1	750	7500	60	750	62	780	450	4500	37	470	4,0-5,0	240	7,1
			15,1	1,9	700	7000	56	700	57	720							
Koerzit 400 K	AlNiCo 28/6	a	31,8	4,0	1100	11000	64	800	65	815	720	7200	44	550	3,5-5,0	320	7,3
			27,9	3,5	1000	10000	60	750	61	765							
Koerzit 450	AlNiCo 39/12	a	43,8	5,5	880	8800	115	1450	119	1500	550	5500	80	1000	2,0-4,0	500	7,3
			39,0	4,9	850	8500	111	1400	115	1450							
Koerzit 1800	AlNiCo 39/15	a	43,8	5,5	740	7400	150	1880	160	2010	440	4400	100	1250	1,5-2,5	750	7,2
			39,0	4,9	700	7000	142	1780	151	1900							
Koerzit 500	AlNiCo 37/5	a	41,4	5,2	1240	12400	51	640	51	645	1000	10000	41	520	3,0-4,5	240	7,3
			37,4	4,7	1180	11800	48	600	48	605							
Koerzit 700[2]	**AlNiCo 52/6**	a	62,1	7,8	1350	13500	58	730	59	740	1200	12000	52	650	1,5-3,0	280	7,3
			51,7	6,5	1250	12500	55	690	56	700							

Compte tenu des risques de désaimantation, les AlNico sont plutôt de forme allongée, ou alors ils doivent être magnétisés après montage (c'est le cas des moteurs Axem) :





(images prises sur le site : http://www.magnets-magnets.com/)

4- Dimensionnement, applications

4.1- Principe du dimensionnement, critère d'Evershed

Il s'agit d'optimiser le flux produit en fonction de critères économique et/ou magnétique.

Par exemple, la recherche d'un volume d'aimant minimal pour une énergie stockée dans l'entrefer donnée conduit à (voir chapitre 2) :

$$W_e = \frac{1}{2}.B_e.H_e.e.S_e$$

en l'absence de fuites, la conservation du flux donne : $B_e.S_e = B_a.S_a$

l'application du théorène d'ampère conduit à : $H_e.e + H_a.e_a = 0$

$$W_e = \frac{1}{2}.\frac{B_a.S_a}{S_e}.\left[-\frac{H_a.e_a}{e}\right].e.S_e = -\frac{1}{2}.B_a.H_a.S_a.e_a$$

donc l'énergie d'entrefer est maximale, à volume d'aimant donné, pour $[B_a.H_a]_{max}$ soit environ : $B_a = B_r/2$, soit une valeur $[B_a.H_a]_{max}$ égale à $\frac{B_r^2}{4.\mu_a.\mu_o}$.

Ce critère de dimensionnement est appelé critère d'Evershed.

Donc un volume d'entrefer donné à magnétiser avec un niveau B_e d'induction conduit immédiatement (en négligeant les fuites) au volume d'aimant minimal nécessaire à sa magnétisation.

Par exemple, considérons une machine électrique cylindrique avec :

- un entrefer équivalent $\mathbf{e_{eq}}$ (coefficient de Carter pris en compte) et dans laquelle l'essentiel de l'énergie magnétique se trouve dans l'entrefer (matériaux magnétiques à grande perméabilité, non saturés)
- un rayon moyen d'entrefer R et une longueur active L

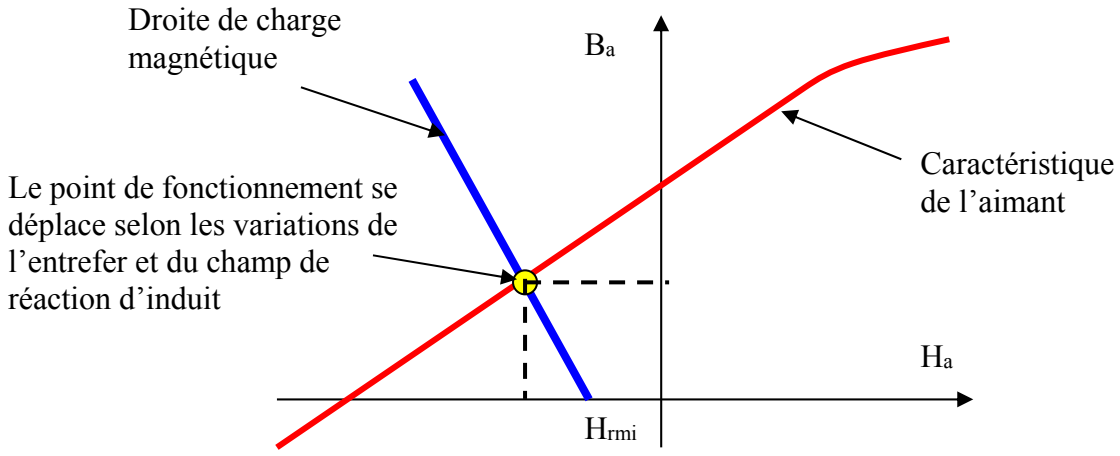
Le volume d'entrefer à magnétiser V_e vaut environ $2\pi.R.L.e_{eq}$, si l'on veut obtenir une induction d'entrefer moyenne B_e, une quantité théorique d'aimant V_a est nécessaire et telle que :

$$\frac{1}{2}.\frac{B_e^2}{\mu_0}.V_e = \frac{1}{2}.\frac{B_r^2}{4.\mu_a.\mu_0}.V_a \Rightarrow V_A \cong 4.\left[\frac{B_e}{B_r}\right]^2.\mu_a.V_e$$

En réalité, les fuites inévitables, surtout en situation d'aimants enterrés ou exploitant des pièces polaires ferromagnétiques, conduisent à la nécessité d'un volume d'aimant supérieur.

On notera qu'en première approximation, le volume d'aimants nécessaire dans une machine électrique est proportionnel à la valeur de l'entrefer, d'où l'importance de le minimiser.

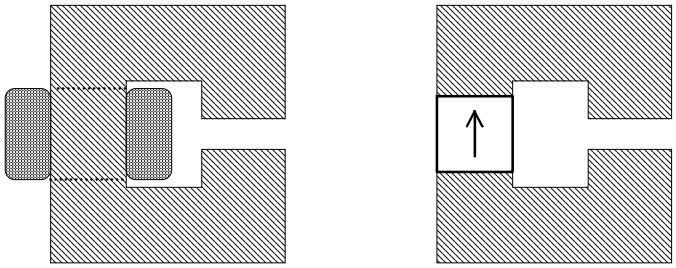
Ce critère n'est pas l'unique critère de dimensionnement, loin de là. En effet, il ne considère pas les risques de désaimantation (limite de H_{cJ}). Il faut donc s'assurer que, dans ces conditions de dimensionnement, aucune zone de l'aimant ne sera soumise à un champ inférieur à H_{cJ} qui dépend lui-même de la température. Le point de fonctionnement réel de l'aimant fluctue en fonction des variations d'entrefer équivalent ainsi qu'en fonction du champ de réaction d'induit. En outre, le champ n'est jamais homogène au sein d'un aimant, il est donc nécessaire de considérer la zone la plus contrainte.
Dans une zone d'aimant, d'une façon général, le point de fonctionnement magnétique se situe comme le montre la figure suivante :



4.2- Intérêt des aimants pour les systèmes magnétiques

Bien sûr, ils ne nécessitent pas de pertes Joule et sont avantageux pour améliorer rendement et compacité. Nous montrons ci-dessous que ces dernières qualités sont obtenues dans le cas des pôles de petites dimensions (petits moteurs et/ou gros moteurs à très grand nombre de pôles).

Comparaison électroaimant avec un aimant création d'un champ inducteur



bobinage nI aimant Br

Avec bobinage

en considérant les pertes Joule : $P_J \propto \rho.\delta^2.V_{cu}$

L'échauffement vaut, pour des moteurs refroidis par la surface (convection naturelle ou forcée, interne ou externe) et à coefficient d'échange thermique donné : $\Delta T \propto \frac{P_J}{S_{th}}$

Alors l'échauffement varie comme : $\Delta T \propto \delta^2.l^*$

Ce qui signifie qu'à moyen de refroidissement par la surface et à échauffement donnés, la densité de courant varie comme : $\boxed{\delta \propto l^{*-0,5}}$

Donc l'excitation que l'on peut maintenir vaut : $nI = k_b.A_w.\delta \Rightarrow nI \propto l^{*1,5}$

L'induction d'entrefer vaut : $B_e \cong \mu_0 \frac{nI}{e}$ (notons qu'elle limitée par la saturation magnétique)

Si l'on effectue une hométhétie, même sur l'entrefer : $B_e \propto l^{*0,5}$ (pour une réduction d'un facteur 10 des dimensions, B_e se trouve multiplié par 0,3)

et si, lorsque l'on réduit les dimensions, on ne peut pas maintenir e constant : $B_e \propto l^{*1,5}$ (pour une réduction d'un facteur 10 des dimensions, Be se trouve multiplié par 0,03 !)

Avec aimant

En ce qui concerne l'aimant : $B_r = C^{te}$ ce qui correspond à une fmm constante

A section de circuit magnétique constante (pas de concentration de flux), l'induction d'entrefer vaut : $B_e \cong B_r . \frac{L_a}{L_a + e}$.

En cas d'homothétie complète, l'induction d'entrefer n'est pas affectée. Si l'on ne peut pas réduire la valeur de l'entrefer, B_e décroît selon une loi dépendant du rapport L_a/e.

Par exemple considérons un cas pour lequel $x = \frac{e}{L_a}$ avec $x(l^* = 1) = x_o = 0{,}2$ pour la dimension de référence

$B_e \cong B_r . \frac{1}{1+x}$, si $e = C^{te}$: $x(l^* = 0{,}1) = 2$, alors

$$B_e(l^* = 0{,}1) = B_e(l^* = 1).\frac{1+x_o}{1+x} = 0{,}4.B_e(l^* = 1)$$

L'induction a, dans ce cas particulier, été multipliée par 0,4 au lieu de 0,03 si l'excitation avait été effectuée par un bobinage.

Bilan

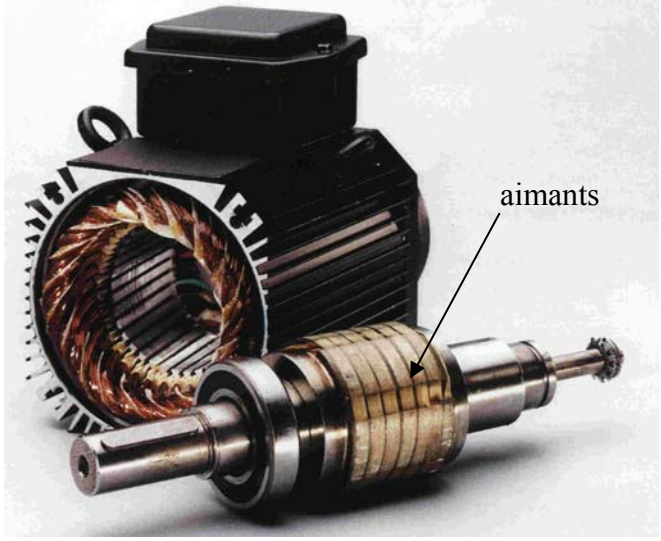
Avantages :

- machines plus compactes (les petits moteurs sont presque tous à aimants),
- meilleur rendement (recherches actuelles pour les économies d'énergie),
- meilleures accélérations pour les moteurs synchrones ou pas à pas…

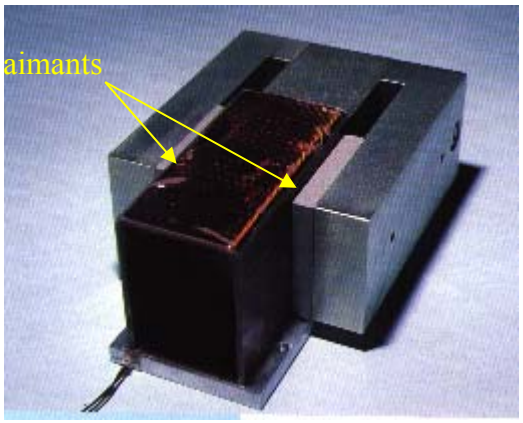
Mais :

- plus coûteux (surtout avec les à aimants terres rares)
- risques de désaimantation (irréversible) : limite de température maxi, courant maxi,
- défluxage impossible dans les MCC, possible dans les machines synchrones par contrôle de l'angle d'autopilotage et construction adéquate de la machine

4.3- Exemples de moteurs ou générateurs utilisant des aimants permanents

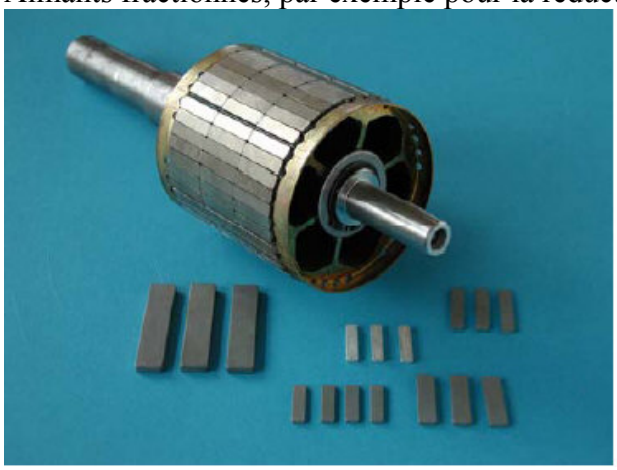


Moteur industriel (*doc aimants Philips*)



Actionneur à bobine mobile (ETEL)
(type haut parleur)

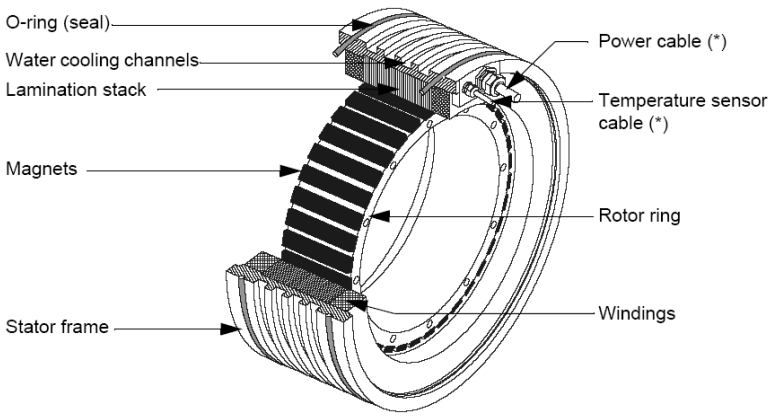
Aimants fractionnés, par exemple pour la réduction du couple de détente





Source : Vaccum Schmelze GmbH 2004.

Moteurs couple ETEL, série TBM (aimants NdFeB)
(jusqu'à 1,2 m de diamètre, 220 pôles, couple maxi continu 17 700 N.m refroidi à l'eau)





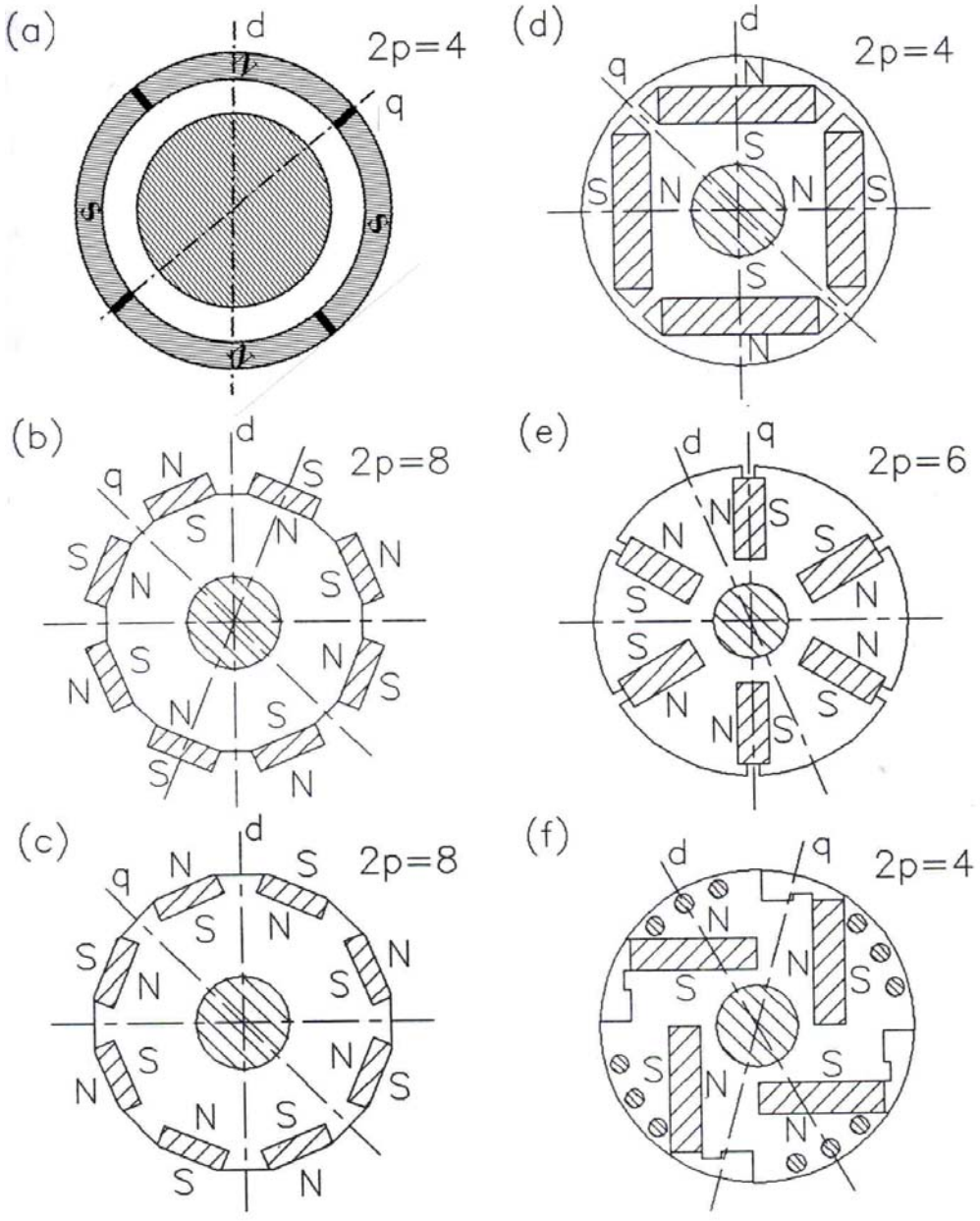
Source ETEL.

Moteur automobile électrique :
Pmax = 45 kW, Cmax = 200 Nm
12 pôles, NdFeB 1,1 T
Masse totale moteur = 30 kg
Masse parties actives = 14 kg
Masse d'aimants = 900g
Rendement max système = 90%

Micromoteur Smoovy™ (Suisse)
rotor à aimants NdFeB, stator sans encoches, dimensions externes : **ϕ = 3 mm** L = **8 mm**, M = 350 mg
Tension 2 à 9 V et I : 20 à 200 mA
Vitesse jusqu'à 110 000 tr/mn
Sous 6 V : Pmax = 85 mW à 40 000 tr/mn
vitesse à vide : 78 000 tr/mn, Cmax : 48 µN.m



Structures d'inducteurs à aimants dans les moteurs à champ radial :



(a) Aimant en surface (tubulaire, aimantation radiale alternée)
(b) Aimants en surface déposés collés ou frettés
(c) Aimants en surface insérés entre des pièces polaires
(d) Aimants enterrés
(e) Amants enterrés (aimantation orthoradiale), structure à aimants à concentration de flux
(f) Aimants insérés et cage d'écureuil pour démarrage asynchrone

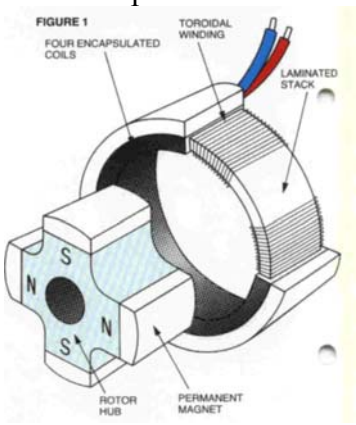
<u>Génératrice éolienne de 750 kW</u> (machine Jeumont J48)
Générateur à aimants permanents à entraînement direct, structure discoïde (à champ axial) : puissance 750 kW à 25 tr/mn (vitesse variable de 9 à 25 tr/mn avec convertisseur à MLI à IGBT).



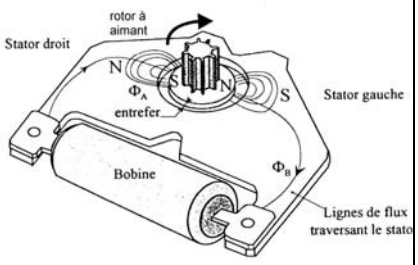


Source : Jeumont Industrie.

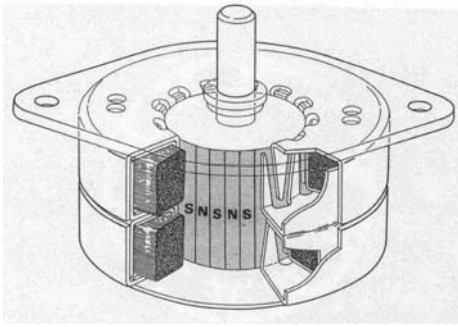
Moteurs spéciaux :



Moteur à débattement limité (bobinage monophasé de Gramme : sans encoches pour éviter un couple de détente)

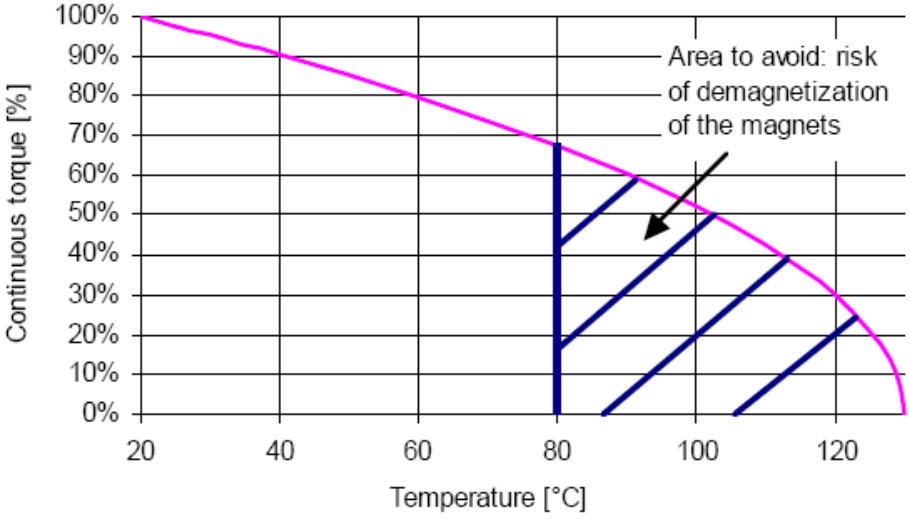


Moteur Lavet utilisé dans les montres (aimant bipolaire de moins de 1 mm de diamètre, terres rares pour minimiser la consommation)



Moteur pas à pas dit à aimants permanents : stator diphasé à griffes (bobinage global par phase) et rotor multipolaire (souvent 12 paires de pôles, donc 48 pas par tour avec 2 phases)

Limites de fonctionnement due au risque de désaimantation en fonction de la température du fluide de refroidissement (ici moteurs couple TBM d'ETEL, refroidis à l'eau) :



Source ETEL.

la température maximale du bobinage est ici de 130°C.

4.4- Quelques aspects du dimensionnement des inducteurs multipolaires

Volume d'aimants nécessaire

Dans le cas des machines, l'énergie stockée dans l'entrefer est proportionnelle au carré de l'induction d'entrefer et au volume à magnétiser soit environ : $e.S_e$. Ceci est une approximation qui ne prend pas en compte les fuites. Notons que l'entrefer e correspond à l'entrefer équivalent incluant les effets d'encoche (via le coefficient de Carter) ou l'épaisseur du bobinage dans le cas d'un enroulement dans l'air sans encoches.

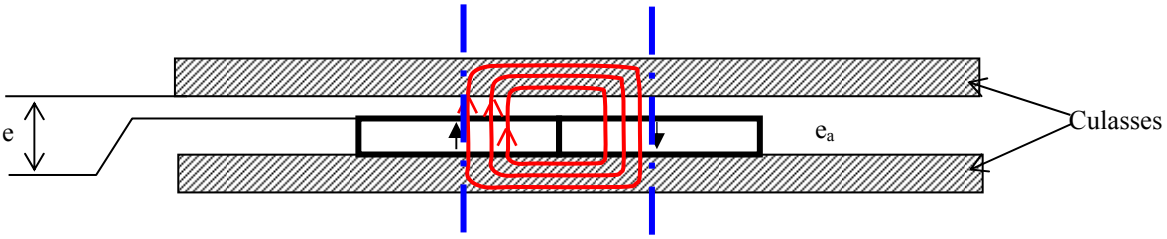
On peut ainsi effectuer une première estimation directe du volume d'aimants nécessaire pour magnétiser un entrefer donné. Fonctionner au point de BH_{max} ($B_a = B_r/2$) permet de minimiser la quantité d'aimants et leur coût. Mais cela ne présume en rien du risque de désaimantation, il faut s'assurer que le champ H_a n'atteint pas la valeur H_{cj} à la température de fonctionnement.

Faire travailler les aimants à une valeur d'induction plus élevée (que $B_r/2$ environ)conduit à un flux inducteur plus important et donc à des performances plus élevées de la machines mais au prix d'une quantité de matière aimantée (coûteuse) plus élevée.

Faire travailler les aimants à une valeur plus faible conduit à une baisse de performances globale.

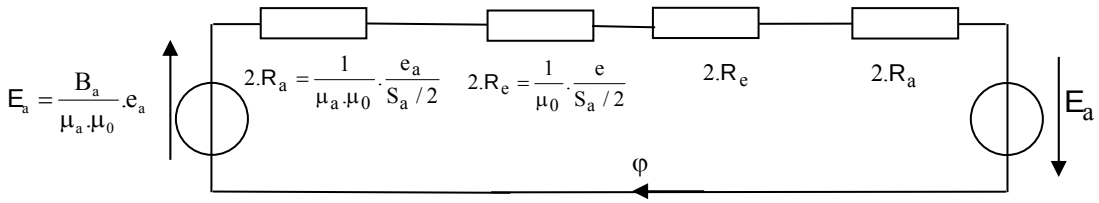
Inducteurs à aimants en surface

Dans une configuration élémentaire (aimant en série avec un entrefer de même surface) :



On notera les axes de symétrie qui permettent de délimiter le domaine élémentaire d'étude.

Le schéma réluctant permettant de démontrer cette expression est le suivant (les aimants en surface permettent, aux éventuels effets de courbure près, de considérer que la section S_a de passage du flux dans l'aimant est également à celle dans l'entrefer) :



$$\varphi = \frac{2.E_a}{2.(2.R_a + 2.R_e)} \quad \text{et} \quad B_e = \frac{\varphi}{S_a/2}$$

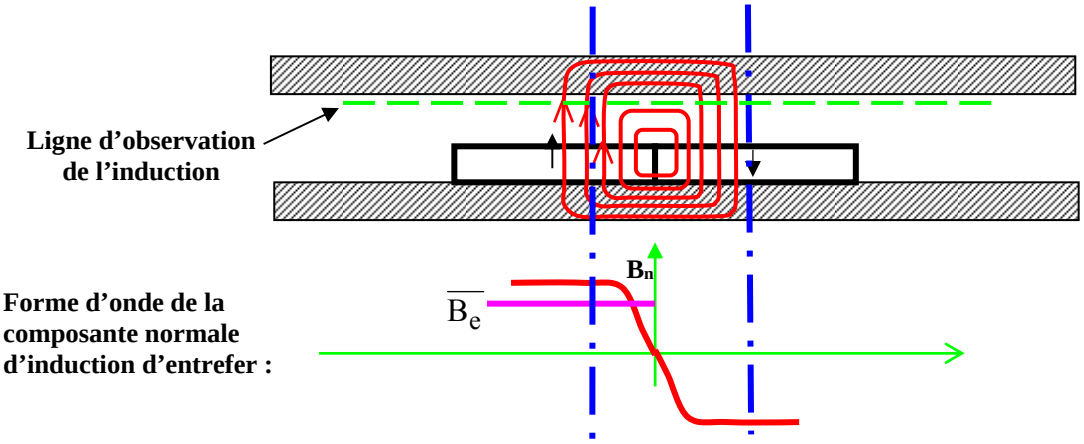
Dans ce cadre d'approximations, l'induction dans l'entrefer vaut alors :

$$B_e \cong B_r . \frac{e_a}{\mu_a . e + e_a} = \frac{B_r}{1 + \frac{\mu_a . e}{e_a}}$$

L'effet de courbure de l'entrefer et des aimants en surface (à aimantation radiale) peut être pris en compte grâce à l'expression suivante :

$$\overline{B_e} \cong B_r . \frac{e_a}{R.\mathrm{Log}\left[\frac{R+e}{R-e_a-e}\right]}$$

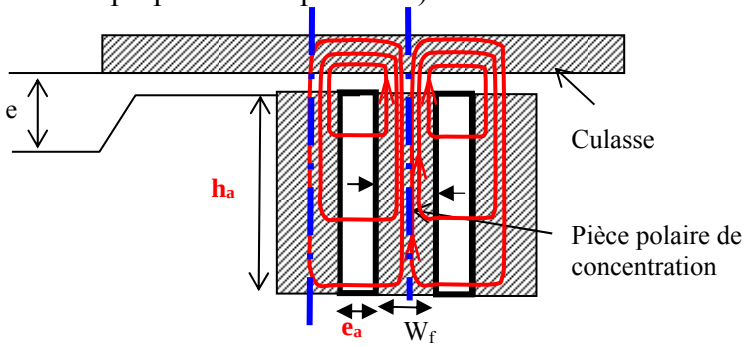
Pratiquement, il y a des fuites inter-aimants en proportions d'autant plus importantes que les dimensions du pôle sont faibles devant l'épaisseur d'entrefer.



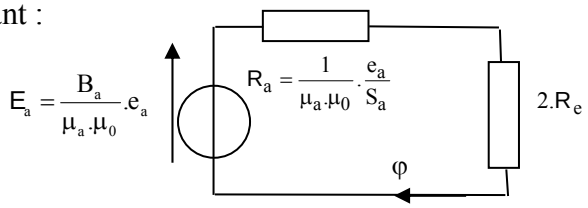
Les fuites conduisent à une diminution de la valeur moyenne (sous un pôle) composante normale de l'induction donc à une diminution du flux inducteur.
L'expression suivante permet d'obtenir une approximation de la valeur moyenne de l'induction sous un pôle en prenant en compte les fuites inter-aimants d'autant plus élevées que les dimensions du pôle sont faibles devant l'entrefer :

$$\overline{B_e} \cong (1-\frac{e}{2.\tau}).\overline{B_{e\,\text{sans fuites}}} \quad \text{où} \quad \tau = \frac{2\pi.R}{p}$$

<u>Inducteurs à concentration de flux</u>
Objectifs de la concentration de flux :
- obtenir dans l'entrefer une induction supérieure à celle dans l'aimant, voire à l'induction rémanente (comme on utilise des pièces ferromagnétiques de concentration, la limite est déterminée par leur saturation) ;
- en réalité, la concentration de flux permet à la fois d'accroître l'énergie magnétique délivrée (dans le montage en surface, l'induction d'entrefer tend asymptotiquement vers Br mais au prix d'un volume d'aimant inadmissible : éloignement du critère d'Evershed). Donc si l'on dispose de l'espace pour loger un volume d'aimants satisfaisant, c'est une solution à exploiter.
- dans ce cas, les fuites sont élevées (en règle générale, plus l'aimant est éloigné de la zone utile plus les fuites prennent des proportions importantes).



On notera, ici également, les axes de symétrie qui permettent de délimiter le domaine élémentaire d'étude.
En négligeant les fuites (souvent assez importantes dans ce type d'inducteur), le schéma réluctant équivalent est le suivant :



$$R_a = \frac{1}{\mu_a.\mu_0}.\frac{e_a}{S_a} \text{ avec } S_a = h_a.L \text{ (L = longueur axiale)}$$

$$R_e = \frac{1}{\mu_a.\mu_0}.\frac{e_a}{\frac{w_f}{2}.L}$$

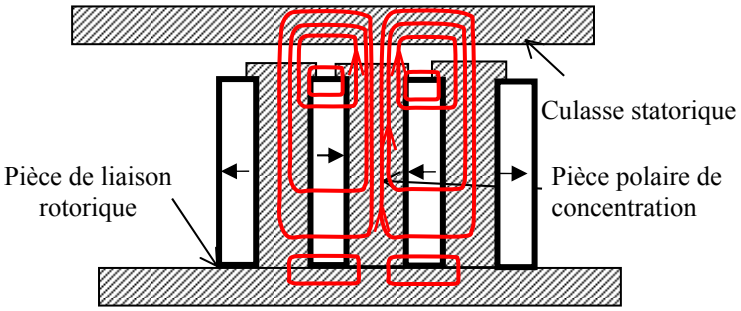
$\varphi = \frac{E_a}{R_a + 2.R_e}$ et l'induction au niveau de la partie ferromagnétique $B_e = \frac{\varphi}{\frac{w_f}{2}.L}$

Notons cependant que l'induction moyenne (sur l'ensemble du pôle) vaut : $\overline{B_e} \cong \frac{w_f}{w_f + e_a}.B_e$

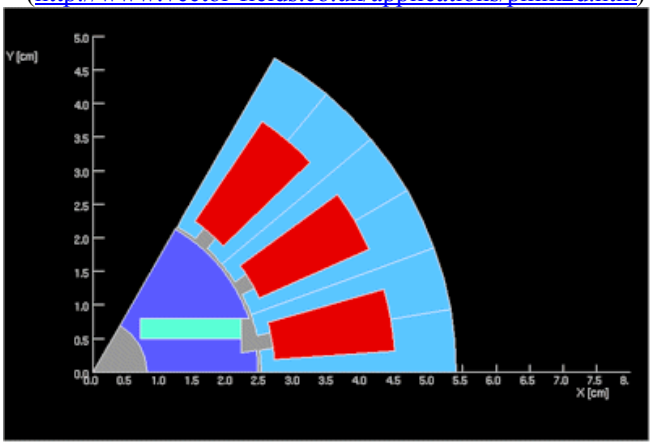
On note $k_c = \frac{S_a}{S_e} = \frac{h_a.L}{W_f/2.L} = \frac{2.h_a}{W_f}$ le rapport des surfaces aimant/entrefer, nommé taux ou facteur de concentration.
Et on obtient :

$$B_e \cong k_c.B_r.\frac{e_a}{2.\mu_a.k_c.e + e_a} = \frac{k_c.B_r}{1 + \frac{2.\mu_a.k_c.e}{e_a}}$$

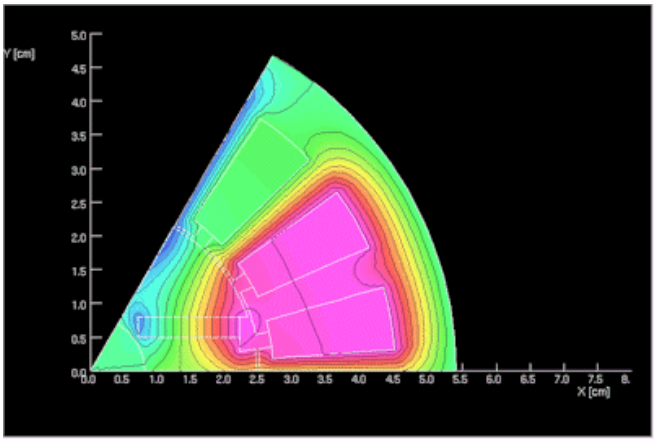
Par rapport aux structures à aimants en surface (ou dans l'entrefer), les fuites sont généralement accrues à cause de la forme du circuit inducteur mais également à cause de la présence d'isthmes d'encoches (maintien mécanique) au niveau de l'entrefer et de courts-circuits magnétiques côté opposé :



Exemple de cartes de champ d'un moteur à inducteur à concentration de flux (http://www.vector-fields.co.uk/applications/pmm2d.htm)



coupe d'un pôle



lignes de champ

Limite de désaimantation

Le dimensionnement complet d'un inducteur doit prendre en compte le risque de désaimantation, notamment dû au champ de réaction d'induit à la température la plus défavorable (la plus basse dans le cas des ferrites, la plus haute, dans les autres).
Dans un moteur à courant continu à collecteur dans lequel l'angle « d'autopilotage » est fixe (imposé par le calage du collecteur), cette limite se traduit par une limite de courant maximal correspondant à une limite de couple maximal.

Attention au démontage de certains moteurs (avec aimants Alnico : moteurs Axem de Parvex, certains moteurs pas à pas hybrides…) dans lesquels les aimants ont été aimantés avec un circuit magnétique monté. Le démontage conduit à un accroissement de la valeur de l'entrefer vu par les aimants qui peut conduire à une perte d'aimantation irréversible.

Température limite

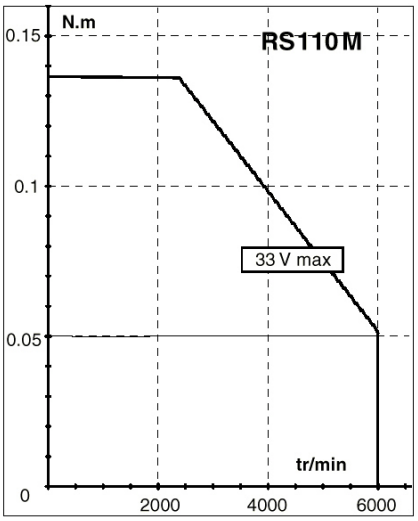
La température des aimants doit bien entendu rester inférieure à la valeur limite spécifiée par le fabricant (d'ailleurs inférieure à la température de Curie proprement dite) à partir de laquelle on assiste à des désaimantations irréversibles.
En dessous de cette température limite, l'effet principal de la température est une baisse de la constante de couple (et de la constante de fem, en fait il s'agit d'une baisse du flux inducteur).

4.5- Exemple de caractéristiques de machines à aimants

Moteurs à collecteur SmCo Parvex série RS.
Exemple RS110M

TYPES MOTEURS	Marquage	Couple permanent en rotation lente	Courant permanent en rotation lente	Tension d'alimentation de définition	Vitesse de définition	Courant impulsion.	F.E.M. par 1000 tr/min (à 25°C)	Constante de couple par ampère	Résistance du bobinage (à 25°C)	Inductance du bobinage	Moment d'inertie du rotor	Constante de temps thermique	Charge axiale maximale admissible	Charge radiale ** maximale admissible	Masse du moteur
Symboles		**Mo**	**Io**	**U**	**N**	**Imax**	**Ke**	**Kt**	**Rb**	**L**	**J**	**Tth**	**Fa** *	**Fr** *	**M**
Unités		Nm	A	V	tr/min	A	V	Nm/A	Ω	mH	10^{-5} kg.m^2	min	daN	daN	kg
RS 110 M	CE	0,05	1,5	20,7	3000	4	3,85	0,037	4,5	1,6	0,24	4,2	3	6	0,27





Le couple impulsionnel, correspondant ici à un courant de 4 A correspond à la limite de désaimantation.

Dérives en température : non spécifiées ici mais avec des SmCo, la constante de couple chute d'environ 0,02% par °C, ce qui est peu. Les moteurs à aimants ferrite voient leur constante de couple perdre 0,2%/°C, soit 20% pour 100°C de variation de température.

La baisse de l'induction rémanente due à l'échauffement se traduit par une diminiution du flux inducteur. Pour obtenir un couple électromagnétique donné, un courant d'induit plus élevé qu'à « froid » est donc nécessaire. Ce phénomène associé à l'accroissement de la résistance du bobinage conduit à une forte augmentation des pertes par effet Joule à chaud.

Par exemple, avec un moteur à aimants ferrite (dérive élevée de B_r égale à – 0,2%/°C) caractérisé à 20°C par :
- une constante de flux inducteur (ou de couple) de 1 N.m/A
- une résistance du bobinage d'induit de 1 Ω

Pour un couple de 10 N.m, les pertes par effet Joule à 20°C valent : 100 W.
Et à 180°C : la baisse de la constante de couple est de 32% soit 0,68 N.m/A, un courant de 14,7 A est donc requis pour obtenir 10 N.m.
La résistance du cuivre croît de 0,4%/°C, elle vaut donc 1,64 Ω, ce qui donne des pertes Joule de 354 W, soit 3,5 fois plus qu'à 20°C.
On constate ainsi la très forte sensibilité de la température sur le rendement énergétique d'un moteur à aimants.

Moteurs de broches Brushless Parvex série HV défluxables (par l'angle d'autopilotage)

4 à 50kW

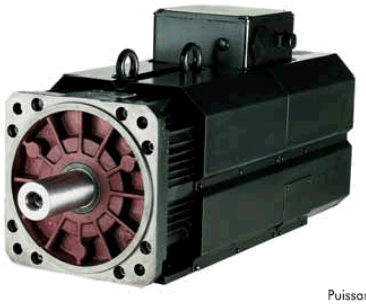
Basés sur une technologie à concentration de flux, les servomoteurs synchrones HV sont adaptés à la motorisation de broche de machines conventionnelles (tours, fraiseuses, rectifieuses).

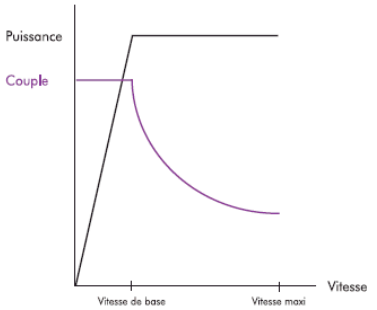
Cette technologie permet de couvrir une gamme de vitesse à puissance constante pouvant atteindre un rapport 10. De plus les moteurs HV présentent des caractéristiques dynamiques équivalentes à des servomoteurs d'axes : couple massique très élevé, faible inertie, couple élevé à l'arrêt ...

HV - Alimentation 400V

Moteur	Calibre variateur DIGIVEX(1)	Couple S1/S6 (N.m)	Puissance S1/S6(2) (kW)	Vitesse base/maxi (tr/min)	Inertie (kgm²)
HV820EZ	16/32	17/20.4	4.3/5.1	2390/8000	0.0035
HV830EM	32/64	25/30	9/10.7	3400/8000	0.0049
HV840EM	32/64	32/38.4	9/10.7	2660/8000	0.0063
HV930EQ	32/64	63.6/70	10/11	1480/7000	0.018
HV930EL	50/80	64/72.5	14.5/16.5	2170/7000	0.018
HV950EQ	32/64	95	10	1020/7000	0.029
HV950EK	50/80	95	15.6	1570/7000	0.029
HVA30JO	50/80	149	16.4	1050/6000	0.027
HVA30JH	100/120	140/157	28/32	1940/6000	0.027
HVA40JH	100/120	200	31	1500/6000	0.035
HVA40JG	150/150	200/240	31/37	1480/6000	0.035

(1) Tension 400V
(2) Tension Bus 540V





- Vitesse jusqu'à 8000 tr/min
- Couple 17 à 240N.m
- Construction robuste et compacte
- Puissance constante sur une plage de vitesse étendue (1 :10)
- Couple élevé à l'arrêt
- Faible inertie pour des accélérations élevées, changements d'outils et cycles rapides
- Protection IP 54
- Isolation classe F

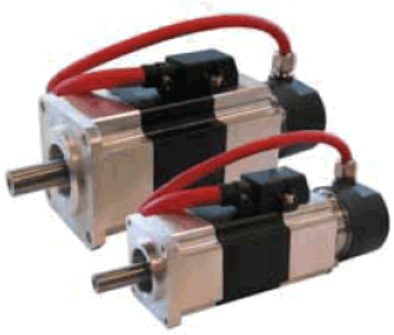
Moteurs Brushless Parvex série NX (aimants NdFeB, 10 pôles, concentration de flux)

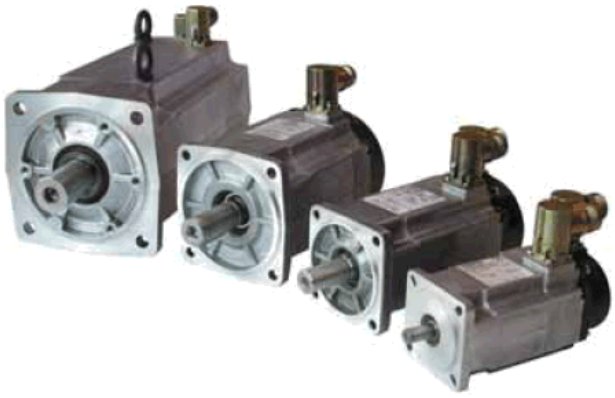
SERVOMOTEURS

BRUSHLESS NX

0.45 à 64N.m

La série NX est la nouvelle gamme de servomoteurs SSD Drives Parvex. De construction robuste et compacte, les servomoteurs brushless NX se caractérisent par une conception innovante 10 pôles pour une qualité de mouvement élevée et une densité de couple importante. Avec un large choix de couple et de vitesse et une approche économique, la série NX est une solution idéale pour les applications servosystème.





Série NX

Moteur	Couple M_0 (N.m)	Vitesse Max (tr/min)		Inertie ($kgm^2.10^{-5}$)
		230V	400V	
NX110EAP	0.45	6000	-	1.3
NX210EAT	1	4000	6000	3.8
NX210EAP	1	6000	-	3.8
NX310EAP	2	2300	4000	7.9
NX310EAK	2	4000	-	7.9
NX420EAV	4	-	2000	29
NX420EAP	4	2300	4000	29
NX420EAJ	4	4000	-	29
NX430EAJ	5.5	3200	-	42.6
NX430EAF	5.5	4000	-	42.6
NX430EAV	5.5	-	1000	42.6
NX430EAP	5.5	-	3000	42.6
NX430EAL	5.5	-	4000	42.6
NX620EAV	8	-	2000	98
NX620EAR	8	2200	3900	98
NX620EAJ	8	4000	4500	98
NX630EAV	12	-	1350	147
NX630EAR	12	1450	2700	147
NX630EAK	12	2800	-	147
NX630EAG	12	4000	-	147
NX630EAN	12	-	4000	147
NX820EAL	16	3600	-	320
NX820EAX	16	-	1900	320
NX820EAR	16	-	3900	320
NX840EAJ	28	2200	-	620
NX840EAQ	28	-	2100	620
NX840EAK	28	-	3500	620
NX860EAD	41	2600	-	920
NX860EAJ	41	-	2600	920
NX860VAG(1)	64	2000	-	920
NX860VAJ(1)	64	-	2600	920

(1) Moteur ventilé

- RÉSEAU 230V ET 400V
- QUALITÉ DE MOUVEMENT ET HAUTE DYNAMIQUE
- CONSTRUCTION ROBUSTE ET COMPACTE
- ROTOR AIMANTS TERRE RARE À CONCENTRATION DE FLUX
- CONCEPTION 10 PÔLES
- RESOLVER EN STANDARD
- PROTECTION NX1 À NX8* : IP64, OPTION IP65
- OPTION FREIN
- ISOLATION CLASSE F
- PRESSE-ETOUPES SUR NX1 ET NX2
- CONNECTEURS ORIENTABLES SUR NX2 À NX8
- CE, HOMOLOGATION UL (NX3 À NX6)

* NX8V : IP44

- MOTEUR PERSONNALISABLE BOBINAGE, ARBRE, BRIDE...
- VERSION CODEUR INCRÉMENTAL, ABSOLU, HIPERFACE...
- VERSION SERVOMOTEURS ANTIDÉFLAGRANTS ATEX 94/9/CE
- VERSION SERVOMOTEURS KIT

Moteur couple Brushless ETEL TMB 450-150 (aimants NdFeB en surface)

ETEL Innovative Motion Control — MOTION TECHNOLOGY

TORQUE MOTOR

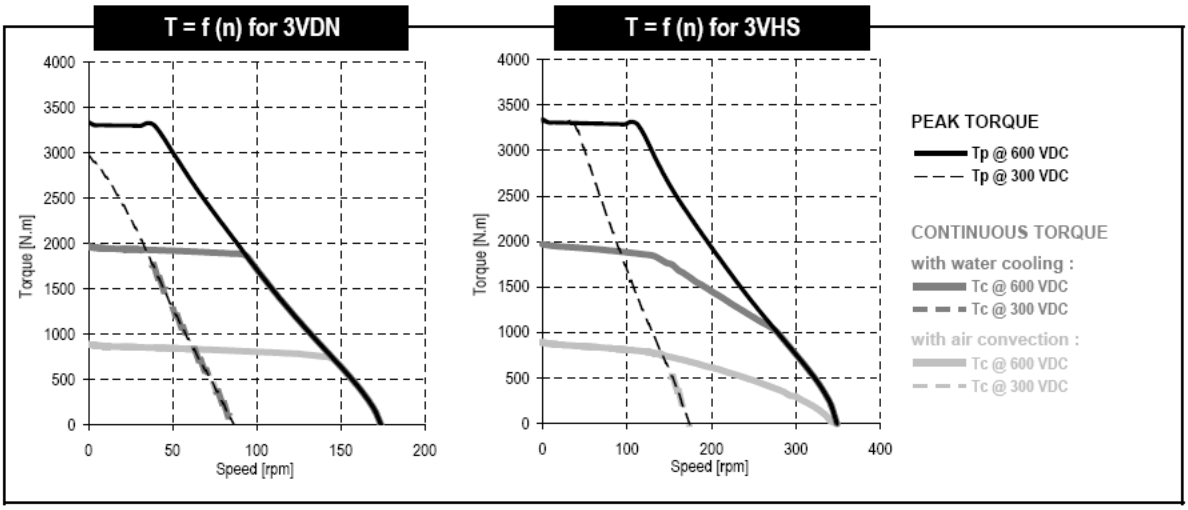
Standard

TMB0450-150

	PERFORMANCES	Winding codes	3VDN	3VHS	3VDN	3VHS
		UNIT	FREE AIR CONVECTION		WATER COOLING	
Tp	Peak torque	Nm	3490		3490	
Tc	Continuous torque	Nm	893	893	1970	1970
Ts	Stall torque	Nm	677	677	1580	1580
Kt	Torque constant	Nm/Arms	39.2	19.6	39.2	19.6
Ku	Back EMF constant (*)	Vrms/(rad/s)	22.6	11.3	22.6	11.3
Km	Motor constant	Nm/√W	27.4	27.4	27.4	27.4
R20	Electrical resistance at 20°C (*)	Ohm	1.37	0.342	1.37	0.342
L1	Electrical inductance (*)	mH	14.3	3.58	13.2	3.3
Ip	Peak current	Arms	164	328	164	328
Ic	Continuous current	Arms	24.3	48.7	57.1	114
Is	Stall current	Arms	18.4	36.9	43.2	86.5
Pc	Continuous power dissipation	W	1740	1740	9560	9560

	SPECIFICATIONS	UNIT	FREE AIR CONVECTION	WATER COOLING
Udc	Max DC Bus voltage	VDC	600	600
Tth	Thermal time constant	s	3600	186
Rth	Thermal resistance	K/W	0.0633	0.0112
2p	Number of poles		88	88
J	Rotor inertia	kgm^2	8.00E-01	8.00E-01
Mr	Rotor mass	kg	24.4	24.4
Ms	Stator mass	kg	87	87
Td	Max. Detent torque (average to peak)	Nm	23	23
ns	Stall speed	rpm	0.0038	0.074
ΔTw	Water temperature difference	K	--	5
Fw	Minimum water flow for ΔTw	l/min	--	27
Δp	Pressure drop at Fw	bar	--	1.7

Notes : (*) terminal to terminal
All data +/- 10%, except 2p
Ambiant Temperature = 20 ° Celcius, Inlet Water Temperature = 20 ° Celcius
Max Coil Temperature = 130 ° Celcius



On remarquera l'effet de la tension d'alimentation du bus continu (300 ou 600 V) sur les caractéristiques de couple impulsionnel ou continu (thermique) ainsi que celui du bobinage (2 nombres de spires variant dans un rapport 1 à 2).
Le couple crête correspond à une limite de désaimantation. Le couple continu à basse vitesse à une limite thermique et le couple à haute vitesse à une limite de tension d'alimentation.

5- Bibliographie

U.S. DESHPANDE, "Recent advances in materials for use in permanent magnet machines-a review", Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE Volume 1, 1-4 June 2003, pp.509-515.

G. LACROUX, Les aimants permanents, Ed. Tech. Lavoisier 1989.

F. ALVES, « Aimants permanents », Revue 3EI n°15, décembre 1998, pp.26-37.

H.C. LOWATT, P.A. WATTERSON, « Energy Stored in Permanent Magnets », IEEE Trans. On Mag., Vol. 35, n°1, jan. 1999, pp.505-507.

D. MATT, « Calcul rationnel des circuits magnétiques comportant des aimants », Revue 3EI n°15, décembre 1998, pp.10-19.

C. LESBROUSSART, « Magnétisation et démagnétisation des dispositifs à aimants permanents », Revue 3EI n°15, décembre 1998, pp.20-26.

P. BRISONNEAU, « Les aimants à base de terres rares : très performants mais coûteux », RGE n°3, mars 1987, pp.21-27.

P. BRISONNEAU, « Aimants permanents - Principes et circuits magnétiques », Techniques de l'Ingénieur, D2090, 09/1990.

F. LEPRINCE-RINGUET, « Aimants permanents - Matériaux et applications », Techniques de l'Ingénieur, D2100, 06/1996.

Applications :

[HAM_WIL94] E.S. HAMDI, « Design of Small Electrical Machines » J. Wiley 1994.

G. LACROUX, Les actionneurs électriques, Ed. Tech Lavoisier1994.

[Miller_89] T.J.E. MILLER, Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives, Oxford Science Publications, (1989).

J. DELAMARE, F. FAURE, « Les paliers magnétiques », Revue 3EI n°15, décembre 1998, pp.2-9.

P. BOIVIN, M. de BORTOLI, E. TOMEY, R. TOUEILLE, « Plasto-aimant : un aimant composite pour capteurs, actionneurs et moteurs de faible puissance », Revue 3EI n°18, septembre 1999, pp.37-46.

C. BESSON (MMT Besançon), « Conversion électromécanique directe : actionneurs et capteurs MMT », colloque Conversion Electromécanique Directe, Cachan 4 février 99, pp. 53-58 *(disponible en bibliothèque)*.

Problèmes d'agrégation :

Génie Electrique 1997
Physique Appliquée 1996

Documentations fabricants (liste non exhaustive) :

Magnequench, Krupp-Widia, Vacuum-Schmelze GmbH
Ugima, Arelec, TDK

6- Remarque sur les unités :

Dans le domaine des matériaux magnétiques, le système CGS (Centimètre Gramme Seconde, abandonné en 1960) persiste :

- les intensités de champ sont souvent exprimées en Oersteds
- les inductions en Gauss

Les équivalences avec le Systèmes International (H en ampères par mètre et B en teslas) sont :

$1\ G = 10^{-4}\ T$ $\qquad$ $1\ T = 10\ kG$

$1\ Oe = \frac{10^3}{4\pi}\ A/m$ $\qquad$ $1\ A/m = 4\pi\ 10^{-3}\ Oe$

$1\ MGOe = \frac{10^5}{4\pi}\ J/m^3$ $\qquad$ $1\ MJ/m^3 = 40\pi\ MGOe$

Il en résulte de fréquentes erreurs de conversion, donc attention aux caractéristiques erronées !