

Matériaux magnétiques pour l'électronique

Richard Lebourgeois et Frédéric Nguyen Van Dau

Summary

Magnetic materials for electronics

We review the state of the art for three groups of magnetic materials: soft magnetic materials for low losses components, hard magnetic materials for permanent magnet and magnetic thin films for magnetoresistive recording.

Mots-clés

Ferrites, faibles pertes, aimants permanents, couches minces, magnétorésistance géante.

Keywords

Ferrites, low losses, permanent magnet, thin films, giant magnetoresistance.

L'utilisation des matériaux magnétiques reste aujourd'hui incontournable pour la production et l'utilisation de l'énergie électrique. Ils sont également très utilisés sous forme de couches ou de multicouches minces pour la lecture, l'écriture ou le stockage d'informations (micro-informatique, enregistrement audio/vidéo...).

Les applications faisant appel aux matériaux magnétiques sont très diverses mais on distingue trois grandes familles en fonction des propriétés électromagnétiques et des mises en œuvre :

- les matériaux magnétiques « doux » parmi lesquels on trouve des métaux plutôt destinés à l'électrotechnique (basse fréquence) et des oxydes plutôt destinés à l'électronique et aux radiocommunications (haute, très haute et ultra haute fréquences). Ils sont utilisés essentiellement pour la réalisation de composants magnétiques faibles pertes (transformateurs, inductances),
- les matériaux magnétiques « durs », métalliques et isolants, pour la réalisation d'aimants permanents. On les trouve le plus souvent sous forme massive, à l'état fritté ou en composites,
- les couches ou multicouches minces magnétiques pour l'enregistrement magnétique et magnéto-optique.

Dans ce qui suit, nous passerons en revue ces trois familles en essayant de mettre l'accent sur les caractéristiques fondamentales qui distinguent ces matériaux et les composants qui en sont issus.

Matériaux magnétiques doux ou faibles pertes

On appelle « doux » un matériau magnétique dont le champ coercitif est faible (< 10 A/m), et qui peut donc s'aimanter facilement sous l'action d'un champ magnétique faible. Cela s'accompagne généralement de perméabilités très élevées et des pertes magnétiques faibles à condition de ne pas dépasser une certaine fréquence qui est d'autant plus basse que la perméabilité du matériau est élevée (figure 1).

Il existe deux catégories de matériaux doux :

- les métaux ou alliages ferromagnétiques à l'état cristallin, amorphe ou nanocristallin. Ceux-ci bénéficient des aimantations les plus élevées (0,8 à 2 T) mais souffrent de résistivités électriques très faibles (environ 10^{-7} $\Omega.m$) qui

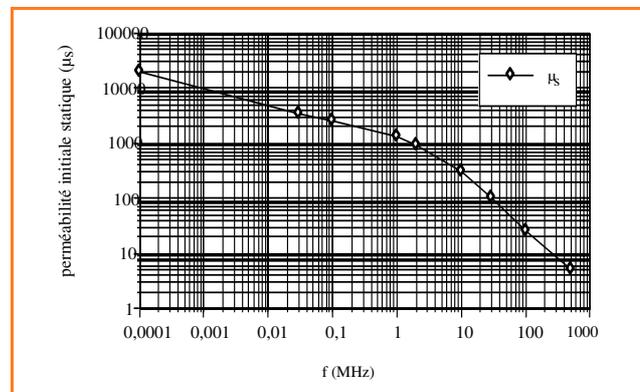


Figure 1 - Variation de la perméabilité initiale statique μ_s d'un ferrite en fonction de sa fréquence maximale de fonctionnement pour des applications « faibles pertes » [1].

limitent leur utilisation à des fréquences inférieures à quelques kHz.

- les ferrites qui sont des oxydes ferrimagnétiques que l'on trouve le plus souvent sous la forme de céramiques polycristallines. Leur aimantation est plus faible (0,3 à 0,6 T) mais leur résistivité électrique très élevée (1 à 10^6 $\Omega.m$) autorise des fonctionnements à plus haute fréquence, de quelques dizaines de kHz (électronique de puissance) à quelques dizaines de GHz (hyperfréquences).

On les utilise sous forme de tôles massives pour les métaux ou de matériau fritté pour les ferrites. Dans leur fonctionnement, tous ces matériaux voient une onde électromagnétique, donc une puissance électromagnétique qu'ils doivent restituer le plus intégralement possible (matériaux dits sans pertes).

La dénomination « matériau doux » est généralement réservée aux applications visant à canaliser un flux magnétique (transformateur, inductance, blindage) mais on trouve aussi des applications utilisant des matériaux doux différemment. Par exemple, les ferrites pour hyperfréquences (1 à 100 GHz) qui sont au cœur de composants comme les circulateurs, les filtres ou les déphaseurs ont des coercivités très faibles mais fonctionnent selon le principe de la résonance gyromagnétique, appelée aussi résonance ferromagnétique.

Leur choix est déterminé uniquement en considérant leurs pertes magnétiques et diélectriques en hyperfréquences selon un mode de fonctionnement très spécifique nécessitant l'emploi d'un circuit de polarisation.

Concernant l'utilisation classique de matériaux doux pour transformateur ou inductance, il est clair que le matériau idéal aurait une aimantation très grande et une perméabilité géante qu'il serait susceptible de conserver même à très haute fréquence. Malheureusement, la physique impose des limites qui font que la perméabilité chute lorsqu'on atteint une fréquence appelée fréquence de coupure. En conséquence, plus la fréquence de fonctionnement est élevée, plus la perméabilité du matériau devra être faible. La *figure 1* illustre ceci dans le cas des ferrites spinelles, mais elle peut être généralisée à l'ensemble des matériaux magnétiques doux.

Le transformateur est un composant clé en électrotechnique comme en électronique de puissance. Il assure des fonctions essentielles comme l'adaptation de tensions ou d'impédances et l'isolation galvanique (sécurité des opérateurs).

La puissance transmise par un transformateur est proportionnelle au produit de l'induction de fonctionnement B par la fréquence de fonctionnement. La *figure 2* représente la variation de ce produit pour les principaux types de matériaux doux.

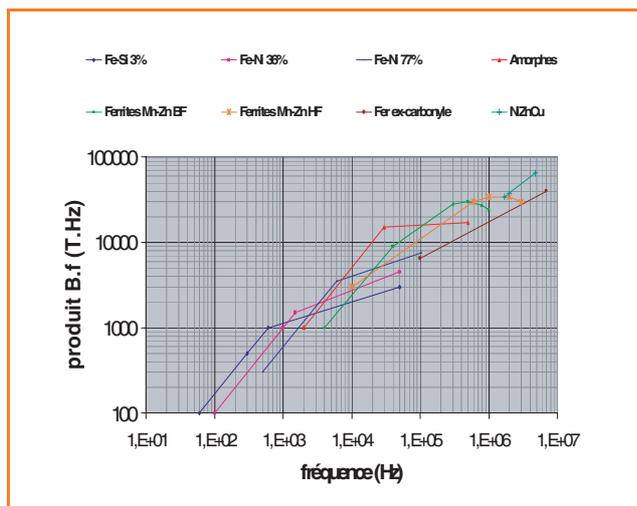


Figure 2 - Produit de l'induction de fonctionnement B par la fréquence de fonctionnement pour différents matériaux magnétiques en fonction de la fréquence pour des pertes volumiques maximales de 250 mW/cm^3 [2].

Au fur et à mesure que la fréquence augmente, on choisira :

- une tôle d'un alliage fer-silicium (jusqu'à 1 kHz environ),
- une tôle de fer-nickel ($f < 10 \text{ kHz}$),
- un ruban amorphe ou nanocristallin ($f < 100 \text{ kHz}$),
- un ferrite Mn-Zn ($\mu > 800$) ou un composite à base de poudre de fer ($\mu < 30$) suivant la perméabilité désirée ($f < 2 \text{ MHz}$),
- un ferrite Ni-Zn ou Ni-Zn-Cu ($f < 100 \text{ MHz}$).

Les ferrites de type Ni-Zn-Cu sont apparus récemment et présentent l'avantage d'avoir des températures de synthèse nettement inférieures aux ferrites conventionnels (800 à 900°C au lieu de 1100 à 1350°C). Leurs basses températures de frittage autorisent des cofrittages avec des métaux (par exemple de l'argent) ou d'autres céramiques (diélectriques ou ferroélectriques). Cette propriété originale

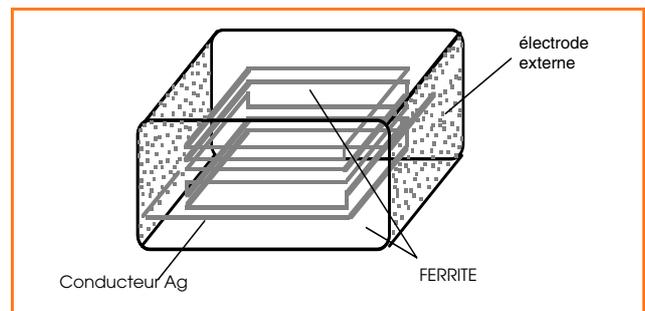


Figure 3 - Schéma d'une micro-inductance à base de ferrite Ni-Zn-Cu et d'argent. L'argent est cofritté avec le ferrite. Le bobinage est complètement noyé dans le ferrite.

est à la base de la réalisation de micro-inductances qui sont aujourd'hui produites industriellement (*figure 3*).

Ce type d'inductance original permet :

- une inductance volumique élevée (on atteint $33 \mu\text{H}$ avec un volume de $1,5 \text{ mm}^3$),
- une minimisation de la pollution électromagnétique, notamment à très haute fréquence où les perméabilités mises en jeu sont nécessairement faibles, ce qui conduit à des fuites importantes du flux magnétique.

Si leurs propriétés originales en font les meilleurs candidats pour la réalisation des micro-inductances, ces ferrites ne sont par contre pas encore utilisés comme noyau magnétique pour composant bobiné conventionnel (tore, U, E ou pot) en raison de leurs pertes magnétiques qui restent plus élevées que celles des ferrites Ni-Zn.

Une étude fine du diagramme Ni-Zn-Cu a permis au Laboratoire céramiques du Laboratoire central de recherches (LCR) de Thales de mettre au point des compositions très performantes pour des applications radiofréquences large bande.

Une illustration en est donnée sur la *figure 4* qui compare les pertes totales volumiques mesurées à $1,5 \text{ MHz}$ d'un ferrite représentant l'état de l'art mondial et d'un ferrite optimisé au LCR. Le gain sur les pertes, d'un facteur 4 environ, permet d'envisager une diminution de moitié du volume du transformateur pour des puissances transmises identiques. Des résultats récents obtenus au laboratoire laissent envisager des améliorations encore plus spectaculaires avec des gains sur les pertes atteignant un facteur 10.

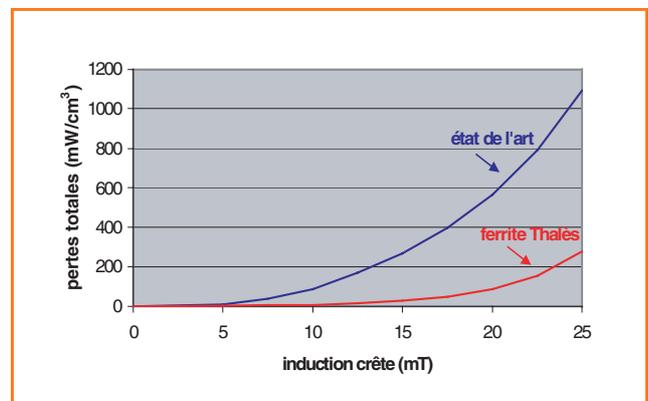


Figure 4 - Pertes totales volumiques en fonction de l'induction crête appliquée pour un ferrite Ni-Zn optimisé pour des applications radiofréquences (état de l'art) et un ferrite Ni-Zn-Cu mis au point au LCR de Thales.

Matériaux magnétiques durs pour aimant

À l'inverse d'un matériau doux, on qualifie de « dur » un matériau magnétique dont le champ coercitif est très élevé (> 10 kA/m), donc qui s'aimante et se désaimante très difficilement. Il est capable de stocker et de restituer de l'énergie magnétique statique, ce qui est à la base de la réalisation des aimants permanents. Le facteur de mérite servant à évaluer la qualité d'un matériau pour aimant est le produit du champ coercitif H_c par l'induction rémanente B_r , appelé produit énergétique. Un second facteur presque aussi important est le coût et la facilité de mise en œuvre (figure 5).

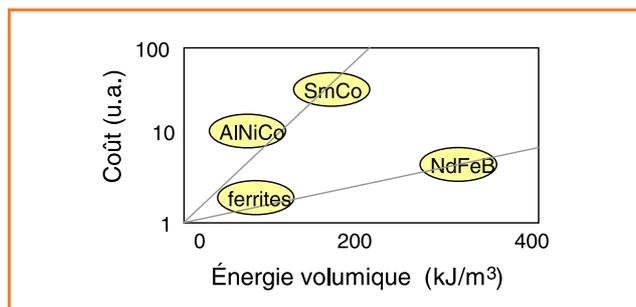


Figure 5 - Coût relatif en fonction de l'énergie volumique pour les principales familles de matériaux pour aimant permanent [3].

Les premiers aimants industriels étaient réalisés à partir d'aciers coercitifs, remplacés à partir des années 30 par les alliages AlNiCo (figure 6).

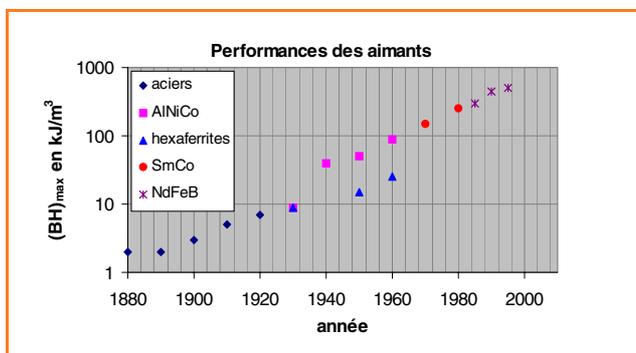


Figure 6 - Produit énergétique des principaux matériaux pour aimant permanent en fonction des années [3].

On peut classer les aimants d'aujourd'hui en trois groupes :

- les ferrites qui sont pour l'essentiel des hexaferrites de baryum ou de strontium (ex : $XFe_{12}O_{19}$, avec $X = Ba$ ou Sr). Leur atout essentiel est leur facilité de mise en œuvre et leur faible coût (voir figure 5). Ils représentent 90 % de la production mondiale en poids et 65 % du chiffre d'affaires.
- les alliages métalliques de samarium-cobalt (ex : $SmCo_5$). Ils ont un produit énergétique bien supérieur aux ferrites mais leur coût dû aux matières premières utilisées est très élevé (voir figure 5).
- les alliages néodyme-fer-bore également métalliques (ex : $Nd_2Fe_{14}B$). Ces matériaux apparus les derniers (voir figure 6) offrent un bon compromis performances/coût.

Les alliages AlNiCo, quant à eux, n'ont conservé d'intérêt que pour des fonctionnements à haute température (jusqu'à 500 °C).

Les domaines d'application des aimants sont très vastes. Citons pour exemple ceux des actionneurs (tête de lecture des disques durs), de l'audio (enceintes et écouteurs) et des moteurs électriques (automobile).

Les axes de progrès sont orientés aujourd'hui vers la compréhension et l'augmentation de la coercivité. Récemment, des substitutions au lanthane et au cobalt dans les hexaferrites de baryum ou de strontium ont abouti à une augmentation notable du champ coercitif. Des structures composites de type matériau dur/matériau doux nanostructurés sont également à l'étude dans le but de mettre à jour de nouvelles propriétés (spring-magnets).

Matériaux magnétiques à magnétorésistance géante

Les matériaux abordés maintenant se présentent non plus sous forme massive comme précédemment mais sous la forme de couches minces. Les progrès réalisés par les techniques de dépôt (épitaxie par jets moléculaires, pulvérisation cathodique) ont permis la réalisation de structures artificielles du type multicouches ou super-réseaux métalliques à partir du milieu des années 80. La possibilité de réduire la taille caractéristique des objets en dessous de longueurs caractéristiques de la physique a ainsi révélé un certain nombre d'effets physiques nouveaux. Parmi eux, le phénomène dit de magnétorésistance géante traduit le fait que la résistance électrique d'une multicouche magnétique peut changer fortement lorsqu'on lui applique un champ magnétique (voir figure 7).

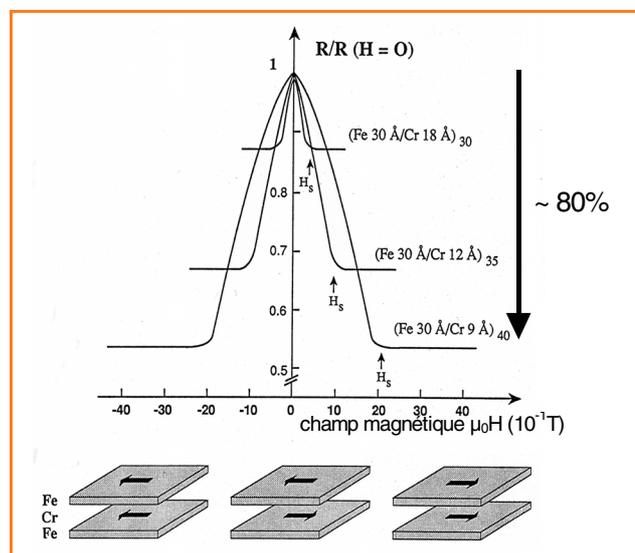


Figure 7 - Magnétorésistance d'un système multicouche fer-chrome mesurée à 4,2 K [4].

La magnétorésistance géante a été mise en évidence à Orsay en 1988 sur des super-réseaux Fe/Cr (voir figure 7). Il a été montré que le couplage entre couches de fer successives étaient de nature antiferromagnétique (moments magnétiques antiparallèles) et que l'application d'un champ dans le plan des couches conduisait à un alignement progressif des moments dans la direction du

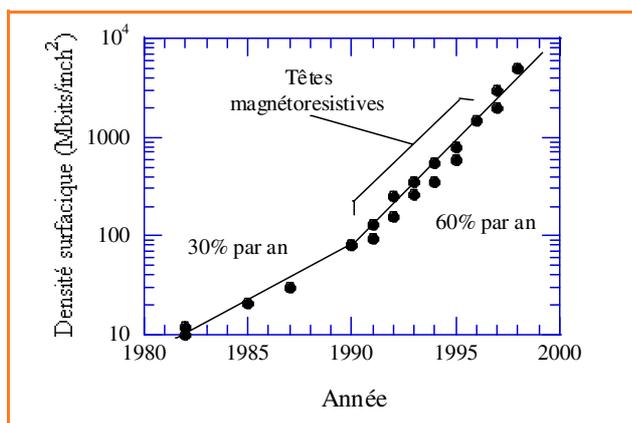


Figure 8 - Évolution des densités d'enregistrement magnétique sur disques durs.

champ appliqué et, dans le même temps, à une diminution importante de la résistance. Ces effets ont été rendus possibles grâce à l'obtention de couches suffisamment minces (épaisseur nanométrique inférieure au libre parcours moyen) donnant ainsi aux électrons la possibilité de traverser les couches non magnétiques de chrome. Le phénomène de magnétorésistance géante résulte en effet de la dépendance en spin de la diffusion des électrons dans la structure. Son amplitude décroît donc très rapidement dès que les épaisseurs individuelles deviennent supérieures au libre parcours moyen.

A l'heure actuelle, le domaine applicatif qui a été le plus largement concerné par cette découverte est celui de l'enregistrement magnétique. Nous pouvons voir sur la figure 8 l'évolution de la densité d'enregistrement magnétique sur disques durs au cours des deux dernières décennies. On constate qu'une rupture est intervenue au début des années 90 lorsque l'on a remplacé les têtes inductives par des têtes magnétoresistives, qui étaient basées à cette époque sur la magnétorésistance anisotrope classique d'un film mince ferromagnétique. A partir de 1998, les disques durs ont été progressivement tous équipés de têtes utilisant la magnétorésistance géante, ce qui a permis de maintenir, voire d'accroître légèrement, la vitesse de progression des performances. Il est ainsi remarquable de constater que des équipements grand public utilisent un effet physique à peine dix ans après sa découverte.

Au-delà de ces applications à l'enregistrement, la découverte de la magnétorésistance géante a aussi contribué à ouvrir un vaste champ de recherche vers ce que l'on appelle l'électronique de spin. Ici les objectifs se situent à beaucoup plus long terme et consistent à définir les bases d'une nouvelle électronique où l'information ne serait plus véhiculée par la charge de l'électron mais par son spin.

Conclusion

Nous avons pu voir à la lumière de quelques exemples que les matériaux magnétiques étaient largement utilisés dans le domaine de l'électronique et sous des formes très variées. Chaque application requiert des propriétés intrinsèques (aimantation, anisotropie, résistivité...) et extrinsèques (champ coercitif, perméabilité, résistance...) spécifiques, ce qui a conduit à un grand nombre de matériaux et de compositions chimiques ainsi qu'à une importante diversité de mises en forme (polycristaux, monocristaux, couches minces, structures composites...). L'intégration et la diminution des volumes des matériels électroniques ont orienté les travaux de recherches actuels vers de nouvelles structures et mises en forme associées à des optimisations fines de compositions chimiques dans les diagrammes existants ; citons par exemple les ferrites à basse température de frittage et à faibles pertes ou encore les modifications des interactions d'échanges dans les matériaux ferromagnétiques nanocristallins qui sont à l'origine de propriétés de douceur magnétique qui n'avaient jamais été observées auparavant.

Références

- [1] Lebourgeois R., *Techniques de l'ingénieur*, 2000, E 1760.
- [2] Sadarnac D., *Les composants inductifs de l'électronique de puissance*, 1997, Supélec.
- [3] *Magnétisme tome II : Matériaux et Applications*, collection Grenoble Sciences, EDP Sciences, Paris, 1999.
- [4] Baibish M.N. et al., *Phys. Rev. Lett.*, 1988, 61, p. 2472.



R. Lebourgeois

Richard Lebourgeois

est responsable des activités « Ferrite » de Thales Research & Technology*.

Frédéric Nguyen Van Dau

est chef du groupe « Dispositifs magnétiques » de l'unité mixte de physique CNRS/Thales**.



F. Nguyen Van Dau

* Thales Research & Technology, Laboratoire Matériaux et Dispositifs Céramiques, Domaine de Corbeville, 91404 Orsay Cedex.

Tél. : 01 69 33 91 39. Fax : 01 69 33 07 55.

E-mail : richard.lebourgeois@thalesgroup.com

** Unité mixte de physique CNRS/Thales, Domaine de Corbeville, 91404 Orsay Cedex.

Tél. : 01 69 33 90 92. Fax : 01 69 33 07 40.

E-mail : frederic.vandau@thalesgroup.com