

Matériaux magnétiques pour les voitures électriques, état de l'art et perspectives

Culture Sciences
de l'Ingénieur

Anthony JUTON - Frédéric MAZALEYRAT

Édité le
07/02/2023

école _____
normale _____
supérieure _____
paris-saclay _____

Cette ressource est issue d'une publication du numéro 110 de La Revue 3EI d'octobre 2022 et fait partie du « Dossier Véhicules Électriques » [4] sur Culture Sciences de l'Ingénieur.

Cette ressource présente les matériaux magnétiques utilisés pour les motorisations de voitures électriques et les pistes suivies actuellement pour les améliorer, dans le but de diminuer les pertes, les coûts et la dépendance aux fournisseurs chinois, tout en gardant les mêmes puissances massiques.

1 – Introduction

Dans une machine électrique, la conversion électro-mécanique repose sur des champs magnétiques au stator et au rotor, qui doivent être canalisés afin de limiter les fuites magnétiques.

Exceptées les voitures électriques de Renault (Zoé, Mégane) qui utilisent des moteurs synchrones à rotor bobiné et quelques exceptions utilisant des moteurs asynchrones, la plupart des voitures électriques intègrent un moteur synchrone à aimants permanents. Les aimants permanents constituent la source de champ magnétique d'excitation au rotor. Les aimants sont qualifiés de matériaux ferromagnétiques durs.

Des matériaux sont aussi nécessaires pour canaliser et multiplier le champ magnétique, ce sont principalement des tôles métalliques ferromagnétiques. Ces matériaux à forte perméabilité sont appelés matériaux ferromagnétiques doux.

Le matériau ferromagnétique contribue à l'induction B et apportant son aimantation M de sorte que finalement $B = \mu_0(H + M)$ où M est beaucoup plus grande que H en général. Pour les matériaux durs, M est dans une large plage indépendante de H . Au contraire, dans les doux M dépend de H ; cette relation peut être linéarisée dans certaines hypothèses en écrivant $M = \chi H$, soit $B = \mu_0 \mu_r H$ avec $\mu_r = 1 + \chi$. Au-delà d'un certain champ (souvent plus de 100 kA/m), l'aimantation tend vers la saturation notée M_s .

Ces deux types de matériaux vont être détaillés ci-après.

2 – Les matériaux ferromagnétiques doux

Un matériau ferromagnétique doux est généralement caractérisé par son cycle $B(H)$, représenté à la figure 1. Pour des champs de quelques milliers d'A/m, $B \approx \mu_0 M$ car $M \gg H$. Ce cycle fermé est appelé cycle d'hystérésis, car les chemins associés à l'augmentation et à la diminution de l'induction B sont différents. Ce cycle est caractérisé par un faible champ coercitif (moins 100 A/m) et une grande perméabilité (de 10 à 10⁶ selon les matériaux). Lorsque H est très grand, $B = \mu_0(H + M_s)$. L'induction ne tend donc jamais vers une valeur de saturation. Pour beaucoup de matériaux la saturation n'est approchée que pour des champs très élevés, plus de 50 kA/m, alors que les courbes des fournisseurs s'arrêtent à 10 kA/m.

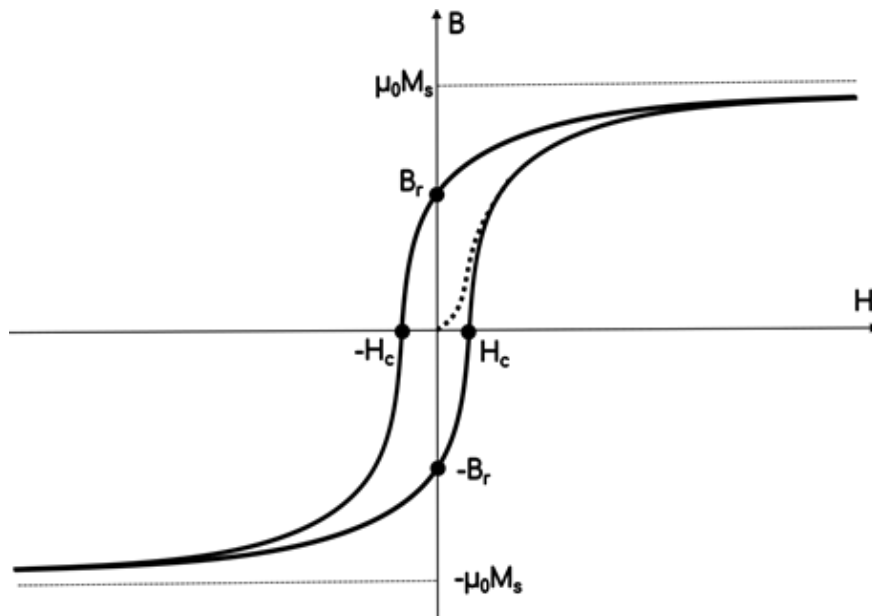


Figure 1 : Cycle d'hystérésis d'un matériau ferromagnétique doux

La surface de ce cycle représente l'énergie dissipée dans le matériau. On décompose classiquement ces pertes en trois composantes : les pertes par hystérésis, les pertes par courants de Foucault et les pertes supplémentaires.

Les pertes par hystérésis correspondent à l'énergie dissipée lorsque que le cycle est parcouru très lentement (régime quasi-statique). Dans un régime périodique, cette énergie est dissipée à chaque période et les pertes ne peuvent être inférieures à cette valeur. Elles ne dépendent que de l'induction crête.

Les pertes par courants de Foucault sont dues à des courants induits prenant naissance dans le matériau en présence d'un flux magnétique variable (figure 2). Le matériau ayant une certaine conductivité, ces courants induits engendrent au sein du matériau des pertes par effet Joule, appelées pertes par courants de Foucault. Elles dépendent d'induction crête, de la fréquence et de la forme d'onde.

Les pertes supplémentaires sont liées à l'inhomogénéité de l'aimantation dans la matière ferromagnétique (domaines de Weiss [1]), dans les métaux, elles sont dues à des courants de Foucault microscopiques, elles dépendent donc aussi de l'induction crête, de la fréquence et de la forme d'onde.

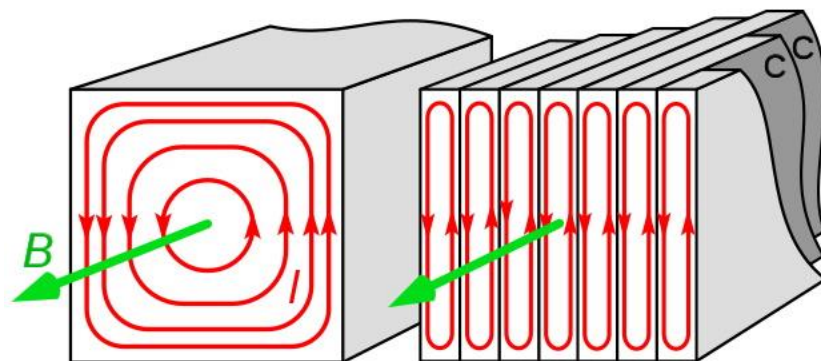


Figure 2 : Origine des courants de Foucault et effet de feuillage [2]

Les caractéristiques d'un matériau ferromagnétique doux de bonne qualité sont donc :

- Une perméabilité magnétique relative μ_r élevée pour multiplier le flux et limiter les fuites (1000 ou plus) ;
- Une induction B la plus élevée possible limitée par la saturation du matériau $\mu_0 M_s$ (typiquement 2 T) ;
- Une résistivité importante, pour limiter les pertes par courants de Foucault (typiquement $r=500 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$) ;
- Un très faible champ coercitif H_c pour limiter les pertes par hystérésis (typiquement $<40 \text{ A/m}$) ;
- Une bonne résistance mécanique pour que la machine ne subisse pas de déformations ;
- Un faible coût de production.

Le fer allie un bon comportement ferromagnétique ($\mu_r > 5000$ selon son degré de pureté et une induction magnétique à saturation de 2,2 Tesla), un coût faible, mais il est mécaniquement trop ductile et assez bon conducteur du courant ($r=100 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$) ce qui favorise les courants de Foucault.

Pour limiter les courants de Foucault, on utilise des tôles de matériaux magnétiques de faible épaisseur, assemblées dans le sens du champ magnétique et isolées entre elles perpendiculairement au sens des courants de Foucault (figure 3).

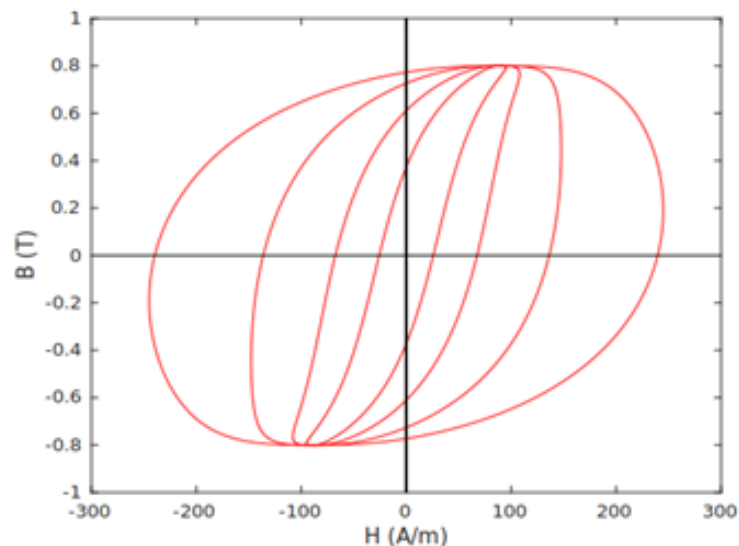


Figure 3 : Cycles d'hystérésis typiques pour une tôle de Fe-Si de 0,35 mm à induction crête fixée et différentes fréquences (50, 200, 500, 1000 Hz)

De plus, on ajoute du silicium au fer pour augmenter sa résistivité et limiter là encore les courants de Foucault.

Actuellement, les machines électriques utilisent donc des tôles fer-silicium (Fe-Si) d'épaisseur 0,35 mm (35/100 de mm). Un alliage de 3 % de silicium permet de multiplier la résistivité par quatre et d'augmenter considérablement la limite élastique. Plusieurs voies d'amélioration sont envisagées :

Diminuer l'épaisseur des tôles permet de diminuer les pertes par courant de Foucault. Des essais sont menés avec des tôles de 24/100 et de 12/100. Cependant, si les tôles sont plus fines, les pertes par hystérésis augmentent parce qu'il y a plus de défauts (les parois des domaines magnétiques s'accrochent sur les parois et le laminage plus fort crée plus de défaut). De plus, diminuer

l'épaisseur des tôles augmente le nombre de tôles – donc les coûts d'emboutissage et d'assemblage – et fragilise l'intégrité mécanique (résistance à la compression, délamination...)

Augmenter la résistivité du matériau permet également de diminuer les pertes par courant de Foucault, mais ajouter plus de silicium dans la tôle la rend cassante. C'est donc en ajoutant de l'aluminium, métal pourtant très bon conducteur, que l'on augmente finalement la résistivité des tôles. Les atomes d'aluminium, tout comme de silicium, se positionnent à la place des atomes de fer dans la maille, ce qui ne perturbe pas trop les propriétés magnétiques, mais ce désordre augmente la résistivité du matériau. Avec un bon compromis aluminium/silicium (jusqu'à 6 %), on arrive à augmenter la résistivité en conservant des propriétés mécaniques et magnétiques correctes (ductilité pour le laminage).

Orienter le grain des tôles donne des résultats intéressants pour les machines électriques de grande taille (transformateurs de transport et distribution). Le métal n'étant pas monocristallin, on sait, par laminage et traitement thermique, orienter les grains des tôles dans une direction privilégiée. On assemble alors la machine avec des tôles aux grains orientés dans le sens du champ. Au niveau des encoches, où le champ n'est pas unidirectionnel, il faut alors utiliser des tôles à grains non orientés. C'est pourquoi actuellement les tôles à grains orientés restent cantonnées aux transformateurs et machines tournantes de grande taille, et restent une voie de recherche pour les machines destinées à l'automobile.

Les poudres de fer (ou SMC pour Soft Magnetic Composite) sont des poudres liées pressées à haute température. Les grains ferromagnétiques sont petits (typiquement 100 μm) et isolés (plus ou moins après le pressage). On dépasse 95 % de charge magnétique. Le matériau obtenu est isotrope et se moule et se recycle facilement, ce qui en fait une voie d'amélioration intéressante pour des machines avec des champs tridimensionnels (machines à flux axial). La perméabilité magnétique est assez faible (μ_r aux alentours de 500), mais cela reste acceptable pour des machines à entrefer. De plus, le moulage permet de faire des dents arrondies, et donc d'améliorer le refroidissement et les formes en trois dimensions. Le procédé est encore limité en taille (typiquement 10 cm de diamètre), mais il est envisageable aussi de ne faire que les pôles du moteur en SMC et le reste en tôle Fe-Si classiques.

D'autres matériaux sont utilisés dans l'aviation où les contraintes de poids sont beaucoup plus strictes. Les tôles fer-cobalt (Fe-Co) ont par exemple une saturation à 2,4 T, mais les recherches pour abandonner le cobalt dans les batteries n'ont pas pour ambition de le réintroduire dans les tôles. Les **rubans amorphes** ont des pertes moins grandes, voire quasi nulles à faible fréquence, car elles n'ont pratiquement pas d'hystérésis et ne font que 17 à 25 μm d'épaisseur. En revanche, c'est un verre assez fragile qui se découpe mal, et le taux de foisonnement est important.

3 – Les matériaux ferromagnétiques durs : les aimants permanents

Le cycle d'hystérésis des aimants est très différent du fait que le champ coercitif est du même ordre de grandeur que l'aimantation rémanente. Les cycles $\mu_0 M(H)$ et $B(H)$ (Fig. 4) n'ont qu'un point en commun, la rémanence. Le champ coercitif du cycle $B(H)$ est plus petit que le champ coercitif intrinsèque H_{ci} , celui du cycle $M(H)$. Les meilleurs aimants ont un champ coercitif intrinsèque tel que $\mu_0 H_{ci} > B_r$. Le facteur de mérite des aimants est la valeur maximale du produit BH qui correspond à 2 fois l'énergie volumique stockée dans l'aimant.

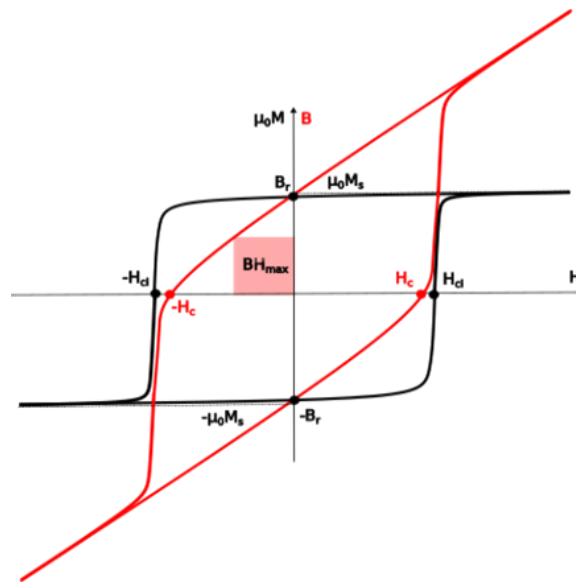


Figure 4 : Cycles d'hystérésis $M(H)$ et $B(H)$ d'un matériau magnétique dur

Un aimant permanent est un alliage, ou un oxyde ayant une induction rémanente B_r et un champ magnétique coercitif H_c important (B_r supérieure à 1 T, H_c supérieur à 100 kA/m à 150 °C).

Le néodyme-fer-bore ($Nd_2Fe_{14}B$ par exemple) est un alliage intermétallique. D'abord, on le broie pour en faire de petits grains. On oriente ensuite les grains avec un champ magnétique, on presse, puis on chauffe à 800 °C pour enlever le liant des grains. Enfin, on procède au frittage (à une température de l'ordre de 1000 °C) qui va souder les grains entre eux et résorber la porosité. Le matériau obtenu est alors aimanté, opération qui nécessite des champs de l'ordre de plus de 2 MA/m. Il peut ensuite être monté la machine et ne peut pratiquement pas être désaimanté.

Le produit d'énergie de ces aimants est d'environ 400 kJ/m³. Leurs performances pour les machines synchrones sont tout à fait satisfaisantes.

Sur les machines synchrones classiques, les aimants sont placés au rotor, et donc difficiles à refroidir. Les recherches visent alors à augmenter leur température de Curie (température à laquelle ils perdent leur aimantation) pour permettre d'augmenter la puissance nominale de la machine.

Pour augmenter la température de Curie, on remplace une partie du néodyme par **du dysprosium et du terbium**. Ces deux métaux sont des terres rares lourdes, très chères et extraites quasi-exclusivement par la Chine, créant ainsi une dépendance géopolitique critique à un concurrent notoire dans le domaine des véhicules électriques.

Les recherches ont montré que le champ coercitif dépend beaucoup de la composition des joints de grains. Afin de limiter la quantité de dysprosium/terbium, une nouvelle technique consiste à ne plus mettre ces métaux dans les grains, mais seulement dans les joints de grains. Pour cela, après le frittage du matériau, on place le dysprosium/terbium par-dessus et, en chauffant, celui-ci s'infiltre au niveau des joints des grains. Les quantités de dysprosium/terbium sont alors réduites de manière importante, pour des températures de Curie dépassant les 200 °C.

Par ailleurs, **les ferrites**, qui sont des céramiques d'oxydes de fer, ferromagnétiques, permettant de créer des aimants permanents sans terres rares (par exemple $SrFe_{12}O_{19}$). Ces matériaux progressent également. Bon marché, ils sont bien connus des constructeurs automobiles. Ils sont utilisés comme aimants permanents sur les moteurs électriques de faible puissance (ventilation, essuie-glaces, sièges...). Les performances sont nettement moins bonnes que celles des aimants à

terres rares. On atteint $B_r = 0,4$ T avec $H_c = 275$ kA/m. Cependant, la température de Curie est bien meilleure et dépasse 450 °C.

L'utilisation du lanthane pour remplacer en partie le strontium, testée récemment, avec un peu de cobalt à la place du fer, permet d'approcher des limites théoriques des 50 kJ/m³ d'énergie volumique et $0,5$ T de champ rémanent.

Ces performances moindres pourraient trouver leur place dans de nouvelles structures de machines synchrones à réluctance variable assistées par des aimants placés au rotor. Le couple de ces machines est principalement dû au couple réluctant provoqué par la saillance du rotor, ce qui permet de mettre des aimants de moindre performance.

Ces aimants pourraient aussi trouver leur place dans les machines synchrones à double excitation de type commutation de flux, où les aimants placés au stator peuvent prendre plus de place afin d'avoir des performances équivalentes aux aimants en terres rares.

Notons enfin que des recherches plus fondamentales existent pour trouver des aimants entre le Nd-Fe-B et les ferrites, par exemple en substituant le néodyme par le cérium, une terre rare plus courante et meilleur marché.

D'autres recherches visent à utiliser du mischmétal, qui est un alliage où les terres rares ne sont pas séparées. On obtient un aimant moins performant mais nettement moins cher, car on évite le coût de la séparation. Les terres rares étant très proches dans la table de Mendeleïev (seule la quatrième couche d'électrons sur six les différencie), elles se trouvent dans les mêmes minéraux et sont donc difficiles à séparer.

Références :

[1] : Matériaux magnétiques doux pour la conversion d'énergie, F. Mazaleyrat, janvier 2021, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/materiaux-magnetiques-doux-pour-la-conversion-denergie#description

[2]: Wikicommons

[3]: Technologies des voitures électriques, Dunod, mai 2021

[4]: Dossier Véhicules Électriques, septembre 2021, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/dossier-vehicules-electriques