

Les applications des matériaux magnétiques



F. Nguyen Van Dau
Unité Mixte de Physique CNRS-Thales

Frederic.vandau@thalesgroup.com

Corporate Department



THALES

Plan du cours

- Matériaux durs – Aimants permanents
- Matériaux doux
- Couches minces, multicouches et nanostructures magnétiques
- Quelques propriétés remarquables des nanostructures
- Enregistrement magnétique
- Capteurs magnétorésistifs
- Mémoires magnétiques MRAM

Applications des matériaux magnétiques



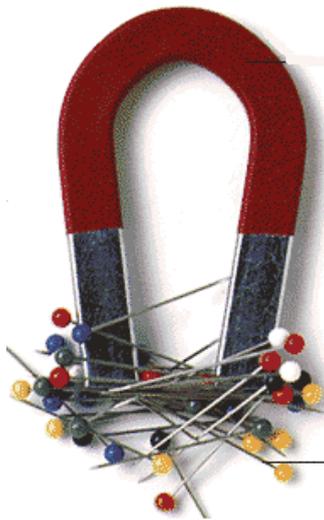
Corporate Department



THALES

This document is the property of THALES. Any reuse or modification is strictly prohibited without THALES' prior written approval.

Matériaux durs – Aimants permanents



Applications des matériaux magnétiques

Corporate Department



THALES

This document is the property of THALES. This content is not to be distributed outside of THALES for external use.

Caractéristiques des aimants permanents

- Un aimant permanent est constitué par un matériau ferromagnétique dit « dur » car il est difficile de modifier ses propriétés d'aimantation spontanée.
- Un aimant permanent est caractérisé par son cycle d'hystérésis ou courbe d'aimantation. Un autre cycle peut être tracé, appelé cycle en induction, ou l'induction magnétique régnant au sein du matériau est portée en ordonnée à la place de l'aimantation.

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$$

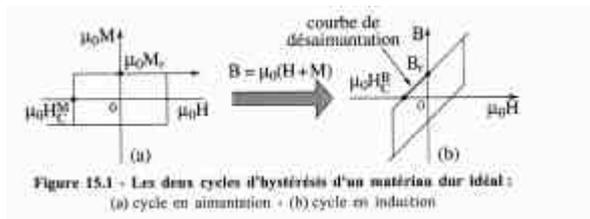


Figure 15.1 - Les deux cycles d'hystérésis d'un matériau dur idéal : (a) cycle en aimantation ; (b) cycle en induction

Applications des matériaux magnétiques

Corporate Department



THALES

This document is the property of THALES. This content is not to be distributed outside of THALES for external use.

Caractéristiques des aimants permanents

- Les matériaux sont en général caractérisés par les paramètres suivants :
 - L'aimantation rémanente M_R et l'aimantation à saturation M_S .
On recherche idéalement un rapport M_R/M_S proche de l'unité.
 - Le champ coercitif de l'aimantation H_{CM} et le champ coercitif de l'induction H_{CB} que l'on souhaite les plus grand possibles.
 - Le coefficient de rectangularité du cycle en aimantation.

Grandes familles d'aimants permanents : les AlNiCo

- Ce sont des alliages à base d'aluminium, de nickel et de cobalt.
- $\mu_0 H_C \approx 0.2T$, mais rémanence faible ($M_R/M_S \approx 50\%$)
- Avantage principal : excellente stabilité thermique, possibilité d'utilisation à haute température ($\approx 500^\circ C$)

Grandes familles d'aimants permanents : les ferrites

- Cette appellation désigne un certain nombre d'oxydes ferriques du type $XO \cdot 6Fe_2O_3$ où X est un élément lourd (Ba, Sr, ...)
- Leur induction rémanente ($B_R = \mu_0 M_R \approx 0.4T$) est la plus faible de tous
- Faible prix de revient
- Bonne tenue dans le temps
- Insensibilité à l'oxydation (ce sont des oxydes)
- Ils dominent largement le marché

Grandes familles d'aimants permanents : les SmCo

- Bonne tenue en température
- Bonne fiabilité en milieu potentiellement corrosif
- Coût élevé dû au fait que le Sm est la terre rare la plus chère utilisable dans un aimant, et le Co est aussi un matériau cher (réserves concentrées au Zaïre)
- Utilisation dans les cas où la fiabilité est prioritaire sur le coût.

Grandes familles d'aimants permanents : les NdFeB

- Les aimants NdFeB peuvent être obtenus par divers procédés à des prix de revient très différents.
- Cycle d'aimantation très carré, fonctionnement quasi-idéal à température ambiante
- Tenue en température réduite ($T_C \approx 300^\circ\text{C}$)
- Sensibilité à l'oxydation à l'air
- En terme de marché, c'est le concurrent principal des ferrites

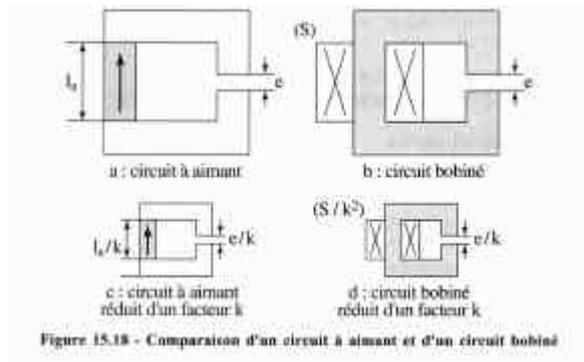
Comparaison des familles d'aimants permanents

Tableau 15.1 - Valeurs typiques des paramètres magnétiques

	B_r (T)	$\mu_0 H_C^M$ (T)	$\mu_0 H_C^H$ (T)	$(BH)_{max}$ (kJ/m ³)	$B_r^2 / 4\mu_0$ (kJ/m ³)	T_C (°C)/(K)
AlNiCo	1,3	0,06	0,06	50	336	857 / 1130
Ferrites	0,4	0,4	0,37	30	31,8	447 / 720
SmCo₅	0,9	2,5	0,87	160	161	727 / 1000
SmCo (2-17)	1,1	1,3	0,97	220	241	827 / 1100
NdFeB	1,3	1,5	1,25	320	336	313 / 586

Application des aimants : miniaturisation

- En tant que source de champ magnétique les aimants permanents sont en compétition avec les systèmes à base de bobinages. Lorsqu'on réduit les dimensions, les systèmes à base d'aimants deviennent les plus performants.



Applications des matériaux magnétiques

This document is the property of THALES. The content is not to be distributed outside THALES for external use.

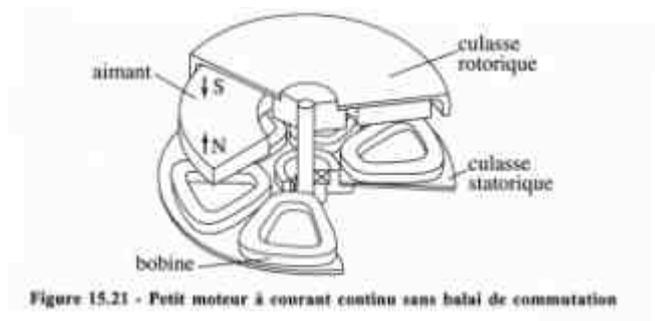
Corporate Department



THALES

Application des aimants : miniaturisation

- Tous les moteurs électriques de petites tailles utilisent des aimants permanents (montres, jouets, rasoirs, ventilateurs)
- Dans l'automobile, les moteurs électriques sont tous à aimants sauf le démarreur.



Applications des matériaux magnétiques

This document is the property of THALES. The content is not to be distributed outside THALES for external use.

Corporate Department

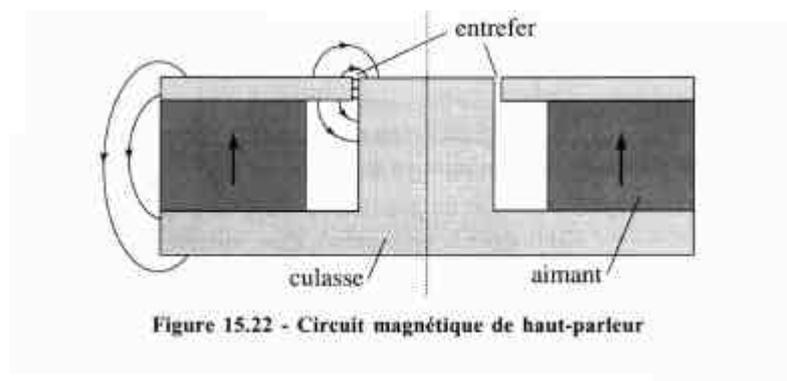


THALES

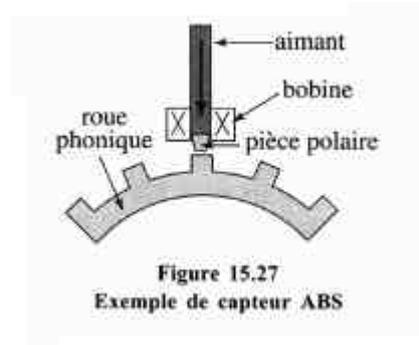
Aimants utilisés comme source de champ permanent

- Les aimants présentent un intérêt évident comme source permanente de flux, ce qui permet de fabriquer des systèmes passifs qui fonctionnent sans alimentation extérieure.
- Sources de champ pour l'imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM). Les sources à aimant sont concurrentes des bobines supraconductrices.
- Systèmes de fixation (loqueteaux, fixations de panneaux, «magnets», ...)
- Actionneurs de type haut-parleurs
- Certains capteurs magnétiques comme les ABS

Aimants utilisés comme actionneurs dans un haut-parleur



Aimants utilisés dans un système ABS



Applications des matériaux magnétiques

15 Corporate Department



THALES

This document is the property of THALES. This document is not to be distributed outside THALES for external use.

Utilisation des aimants en répulsion

- Avec les systèmes supraconducteurs, les aimants sont l'un des seuls systèmes permettant de générer une force de répulsion significative.
- Dans ce type d'utilisation, les aimants fonctionnent dans un champ inverse important. Leur champ coercitif doit donc être particulièrement élevé. Les aimants SmCo sont particulièrement adaptés à ce type de fonctionnement.
- Dans les années 1960, utilisation pour la lévitation du disque tournant des compteurs électriques (le frottement empêche le comptage des faibles consommations).
- Fabrication de paliers magnétiques utilisés dans les systèmes de centrifugation gazeuse, les pompes turbomoléculaires, ou les volants de stabilisation des satellites (SPOT).

Applications des matériaux magnétiques

16 Corporate Department



THALES

This document is the property of THALES. This document is not to be distributed outside THALES for external use.



Applications des matériaux magnétiques

This document is the property of THALES. This content is not to be distributed outside THALES. Pour en savoir plus, contactez THALES à l'adresse suivante : thales.com

 Principales caractéristiques des matériaux doux 

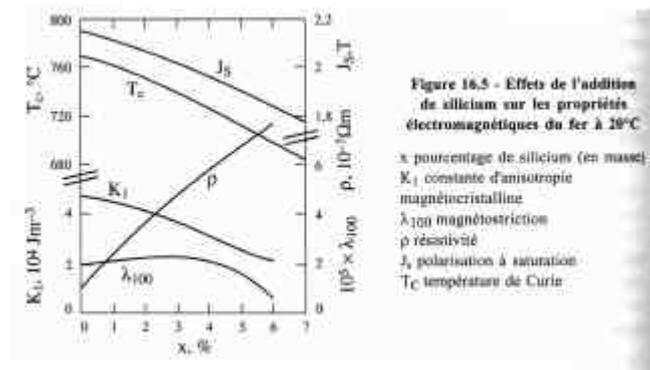
- Un matériau doux a pour fonction de renforcer ou canaliser le flux d'induction provenant de courants électriques, d'aimants ou d'ondes extérieures (cas des blindages), ce qui nécessite les qualités suivantes :
 - Une aimantation à saturation aussi élevée que possible
 - Une forte perméabilité (ou en d'autres termes une forte susceptibilité), de faibles variations de champ magnétique devant créer de fortes variations d'aimantation.
 - On recherche des matériaux très peu coercitifs.

Applications des matériaux magnétiques

This document is the property of THALES. This content is not to be distributed outside THALES. Pour en savoir plus, contactez THALES à l'adresse suivante : thales.com

Matériaux doux : les alliages fer-silicium

- L'introduction de Si permet de stabiliser la phase cristalline cubique centré à toute température, ce qui assouplit les possibilités de traitement métallurgique du matériau (utilisation sous forme de tôles).



Applications des matériaux magnétiques

19 Corporate Department

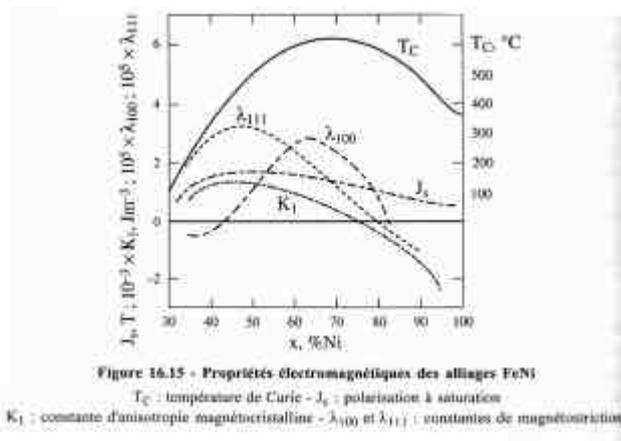


THALES

This document is the property of THALES. The content is not to be disseminated outside THALES for external use.

Matériaux doux : les alliages fer-nickel

- Ils cristallisent en phase cfc lorsque la proportion de Ni excède 30%. Il y a trois domaines de composition particulièrement intéressants (30%, 50% et 80%).



Applications des matériaux magnétiques

20 Corporate Department

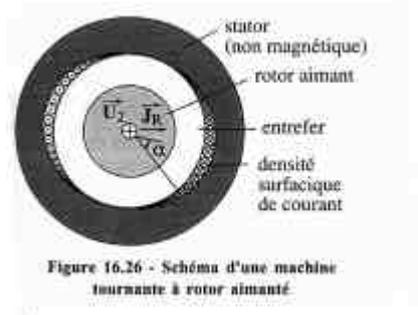


THALES

This document is the property of THALES. The content is not to be disseminated outside THALES for external use.

Utilisation des alliages Fe-Si

- Machines tournantes (moteurs, dynamos, alternateurs), en particulier dans le domaine de l'électroménager et de l'automobile.
- Transformateurs de faible puissance
- Certains dispositifs comme les contacteurs ou compteurs électriques



Utilisation des alliages Fe-Ni (30%)

- Ces alliages possèdent une température de Curie faible. Ils présentent donc une variation rapide et réversible de l'aimantation à saturation.
- Utilisation de cette caractéristique dans les shunts magnétiques chargés de stabiliser en température les circuits magnétiques de certains dispositifs (compteurs électriques, appareils de mesure à cadre mobile, tachymètres, hauts parleurs).
- Certaines applications pour l'électroménager (autocuiseurs de riz, fonds de casseroles à chauffage par induction) exigent des points de Curie vers 150-200°C. On utilise alors des alliages à 38% de Ni avec 9 à 10% de Cr.
- Blindage de tubes de télévision : alliage Invar à 36%

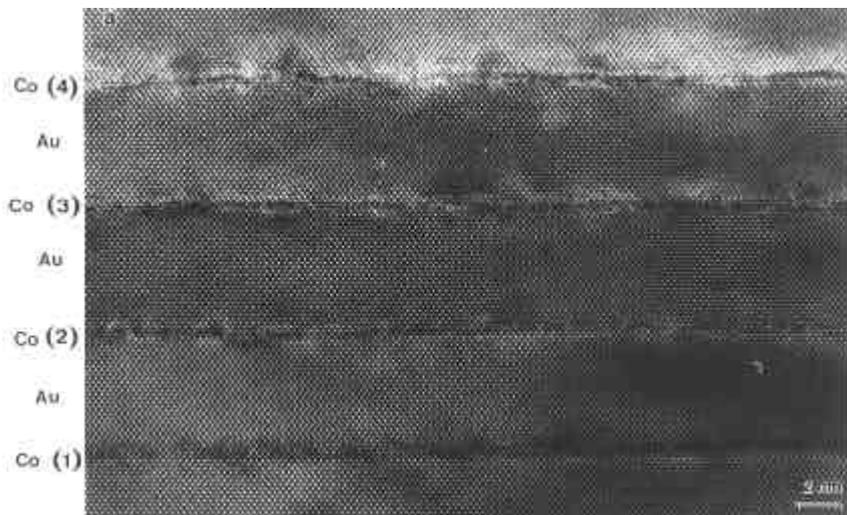
Utilisation des alliages Fe-Ni (autour de 50%)

- On les utilise pour leur polarisation élevée
- A l'état massif : relais et dispositifs de sécurité
- Tôles : circuits enroulés, moteurs de petite dimension, écouteurs téléphoniques

Utilisation des alliages Fe-Ni (autour de 80%) : permalloy

- On exploite ici les faibles niveaux d'anisotropie et de magnétostriction.
- Alliages à très haute perméabilité : dispositifs de sécurité (disjoncteurs différentiels)
- protection contre les champs magnétiques (blindage) : tubes cathodiques, dispositifs d'enregistrement magnétique, chambres amagnétiques pour mesures en champ très faible (géomagnétisme, magnétoencéphalographie et magnétocardiographie)

Couches minces, multicouches et nanostructures



Applications des matériaux magnétiques

25

Corporate Department



THALES

This document is the property of THALES. This content is not to be distributed outside of THALES. This document is the property of THALES. This content is not to be distributed outside of THALES.

Apparition des couches minces magnétiques

- Le développement de techniques de croissance sophistiquées a permis à ce domaine de se développer dans les années 1980.
- La taille caractéristique des objets se situe dans la gamme de 1 à qqs 100Å, ce qui correspond à un certain nombre de longueurs caractéristiques du magnétisme : libre parcours moyen des électrons, portée de l'interaction d'échange, largeur des parois de domaines, longueur d'onde de Fermi.

Applications des matériaux magnétiques

26

Corporate Department



THALES

This document is the property of THALES. This content is not to be distributed outside of THALES. This document is the property of THALES. This content is not to be distributed outside of THALES.

Pulvérisation cathodique

- C'est la technique la plus répandue. Un plasma est obtenu à partir d'un gaz neutre (argon). Ces ions sont accélérés sur une cible et la pulvérisent. Les éléments arrachés se déposent sur le substrat.
- Vitesse de dépôt typique : 10Å/mn
- Un système multi-cible permet de réaliser des empilements multicouches.

Applications des matériaux magnétiques

This document is the property of THALES. This content is not to be distributed outside THALES. Pour en savoir plus : THALES 2014. Tous droits réservés.

27 Corporate Department

Pulvérisation cathodique

- ⊙ 8 cibles (2 convergentes)
- ⊙ Biseaux possibles
- ⊙ Dépôt sous champ magnétique
- ⊙ Dépôt à travers masques

Applications des matériaux magnétiques

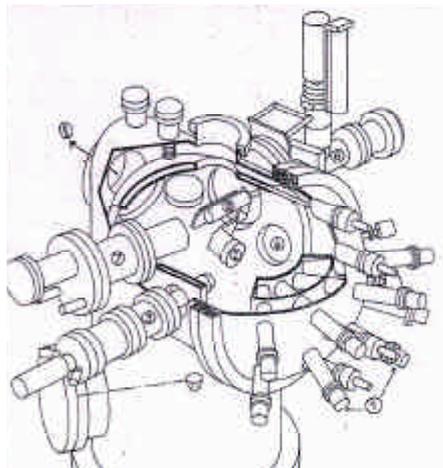
This document is the property of THALES. This content is not to be distributed outside THALES. Pour en savoir plus : THALES 2014. Tous droits réservés.

28 Corporate Department

Epitaxie par jets moléculaires

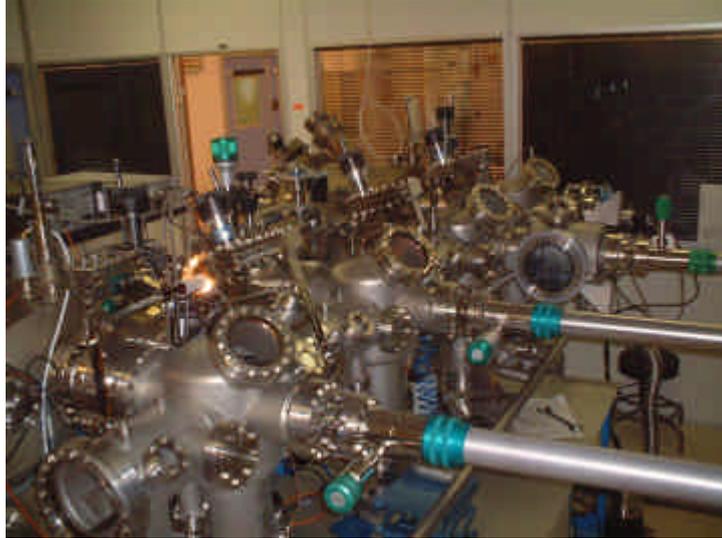
- Dans une enceinte à ultra-vide, on évapore les espèces désirées grâce à des cellules d'effusion (ou un canon à électrons) situées face au substrat.
- Des caches mécaniques situés face aux cellules permettent d'interrompre les flux. La vitesse de dépôt typique est 1Å/mn.
- Le libre parcours moyen des espèces évaporées est grand par rapport à la distance source-substrat. On est dans un régime laminaire.
- L'environnement ultra-vide permet d'installer des équipements de caractérisation in-situ (diffraction d'électrons, spectrométrie de masse,...)

Epitaxie par jets moléculaires



- ① Cellules d'évaporation
- ② Porte échantillon et four de croissance
- ③ Canon à électrons (RHEED)
- ④ Ecran fluorescent
- ⑤auge de flux
- ⑥ Manipulateur
- ⑦ Spectromètre de masse quadrupolaire
- ⑧ Transfert vers la chambre d'analyse

Epitaxie par jets moléculaires



Applications des matériaux magnétiques

 Corporate Department

 **CNRS**
CENTRE NATIONAL
DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

 **UNIVERSITÉ
PARIS-SUD 11**

THALES

This document is the property of Thales. The content is not allowed to be distributed outside Thales' perimeter.