




**Anisotropie magnétique**

Unité Mixte de Physique

**Anisotropie magnétique**

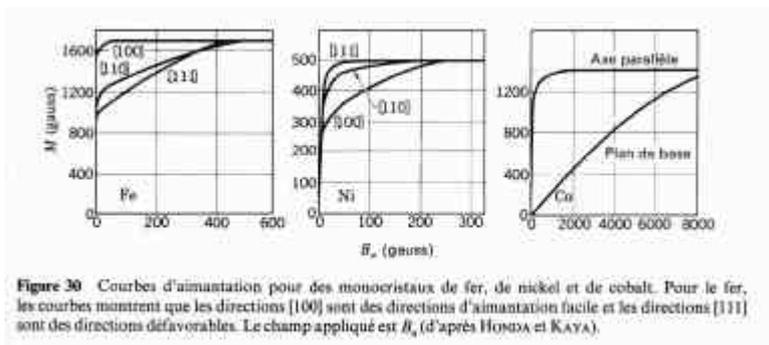

- ◆ Les propriétés magnétiques dépendent de la direction selon laquelle on les observe. Ceci se traduit par un terme anisotrope dans l'énergie.
- ◆ Il y a plusieurs causes à cette anisotropie. On peut distinguer :
  - ⇒ L'anisotropie magnétocristalline
  - ⇒ L'anisotropie de forme
  - ⇒ etc ...

Anisotropie magnétique


 Unité Mixte de Physique

## Anisotropie magnétocristalline

- ◆ Considérons un échantillon monocristallin en forme de sphère. Le cycle d'aimantation est différent selon que le champ est appliqué le long de telle ou telle direction cristallographique.
- ◆ La figure ci-dessous plusieurs courbes d'aimantation obtenues dans le cas du Fe, du Ni et du Co.



Anisotropie magnétique

2 Unité Mixte de Physique



This document is for internal use only. It is not to be distributed outside the company. The copyright is reserved by THALES. All rights reserved.

## Anisotropie magnétocristalline

- ◆ Dans le cas du fer, l'aimantation atteint plus rapidement sa valeur à saturation lorsque le champ est appliqué le long d'une direction  $\langle 100 \rangle$ . Ces directions sont appelées directions de facile aimantation ou axes faciles. Au contraire, la saturation est difficile à atteindre le long des directions  $\langle 111 \rangle$ , qui sont des axes difficiles.
- ◆ Dans le cas du Ni qui est cfc, les directions de facile aimantation sont les directions  $\langle 111 \rangle$ , alors que les directions  $\langle 100 \rangle$  sont des directions difficiles.
- ◆ Pour ce qui est du Co qui a une structure hexagonale, la direction facile est celle de l'axe c et les directions difficiles sont dans le plan de base (sans direction privilégiée).

Anisotropie magnétique

3 Unité Mixte de Physique



This document is for internal use only. It is not to be distributed outside the company. The copyright is reserved by THALES. All rights reserved.

## Origine de l'anisotropie magnétocristalline

Anisotropie magnétique

- ◆ L'anisotropie magnétocristalline est essentiellement due au couplage spin-orbite, c'est à dire au couplage qui lie le spin de l'électron et son mouvement orbital.
- ◆ Dans le cas des métaux de transition, les électrons responsables du magnétisme sont les électrons 3d. Le champ cristallin qui lie les orbitales entre elles est fort. Lorsque l'atome est au sein du cristal, les états orbitaux 3d interagissant fortement, les orbitales sont donc fortement liées aux axes cristallins. Le moment magnétique orbital est bloqué. Même des champs magnétiques très importants ne peuvent débloquer ces moments orbitaux.

4 Unité Mixte de Physique



This document is the property of Thales. This document is confidential and its disclosure is prohibited. Thales is a registered trademark of Thales Group.

## Origine de l'anisotropie magnétocristalline

Anisotropie magnétique

- ◆ Le couplage spin-orbite lie le spin à l'orbite. Le spin et le moment de spin sont donc liés également aux axes cristallins par ce couplage.
- ◆ L'énergie nécessaire pour faire tourner le système de spins loin d'un axe de facile aimantation est l'énergie d'anisotropie. C'est donc l'énergie nécessaire pour vaincre le couplage spin-orbite.

5 Unité Mixte de Physique



This document is the property of Thales. This document is confidential and its disclosure is prohibited. Thales is a registered trademark of Thales Group.

## Expression de l'énergie d'anisotropie magnétocristalline

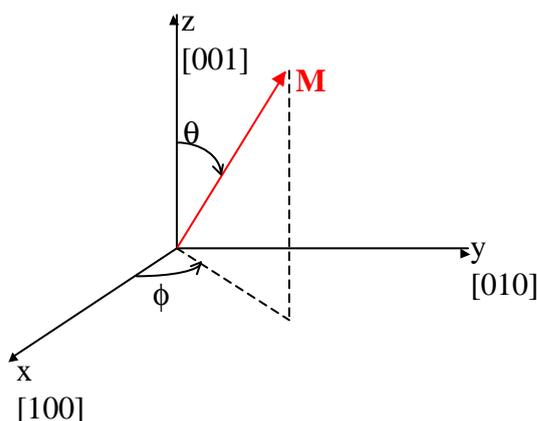
### Cristal cubique

- ◆ L'aimantation est repérée par rapport à ses cosinus directeurs :

$$\mathbf{a}_1 = \sin q \cos f$$

$$\mathbf{a}_2 = \sin q \sin f$$

$$\mathbf{a}_3 = \cos q$$



Anisotropie magnétique

6 Unité Mixte de Physique



THALES

This document and the data included are the property of Thales. They contain confidential information which Thales' prior written approval.

## Expression de l'énergie d'anisotropie magnétocristalline

- ◆ Les directions [100], [010] et [001] étant équivalentes, il doit être possible d'interchanger  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  et  $\alpha_3$  sans modifier l'énergie.
- ◆ Les directions [100] et [-100] étant équivalentes, l'énergie doit être la même  $\Rightarrow$  on a que des puissances paires de  $\alpha_1$  (idem pour  $\alpha_2$  et  $\alpha_3$ ).
- ◆ L'énergie a donc la forme suivante :

$$E_{MC} = K_0(\mathbf{a}_1^2 + \mathbf{a}_2^2 + \mathbf{a}_3^2) + K_1(\mathbf{a}_1^2\mathbf{a}_2^2 + \mathbf{a}_1^2\mathbf{a}_3^2 + \mathbf{a}_2^2\mathbf{a}_3^2) + K_2(\mathbf{a}_1^2\mathbf{a}_2^2\mathbf{a}_3^2)$$

- ◆ Compte tenu du fait que  $\mathbf{a}_1^2 + \mathbf{a}_2^2 + \mathbf{a}_3^2 = 1$ , l'énergie d'anisotropie magnétocristalline s'écrit (à une constante près) :

$$E_{MC} = K_1(\mathbf{a}_1^2\mathbf{a}_2^2 + \mathbf{a}_1^2\mathbf{a}_3^2 + \mathbf{a}_2^2\mathbf{a}_3^2) + K_2(\mathbf{a}_1^2\mathbf{a}_2^2\mathbf{a}_3^2)$$

Anisotropie magnétique

7 Unité Mixte de Physique

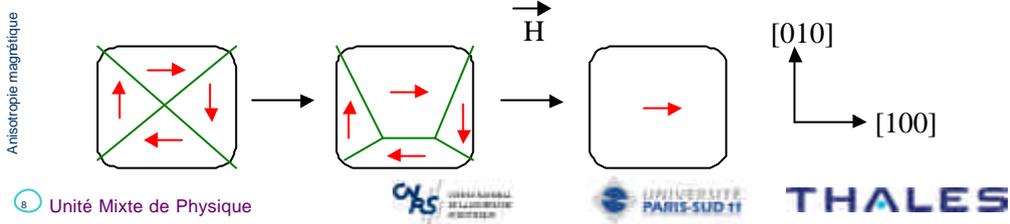


THALES

This document and the data included are the property of Thales. They contain confidential information which Thales' prior written approval.

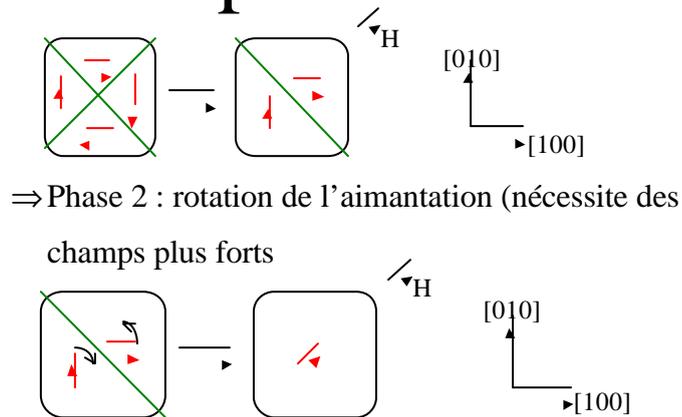
## Comportement expérimental

- ◆ A champ nul, l'aimantation sera donc dans une direction de facile aimantation correspondant au minimum d'énergie, dans chaque domaine.
- ◆ Exemple : Fe ;  $K_1=4.8 \cdot 10^4 \text{J/m}^3$  ;  $K_2=1.2 \cdot 10^2 \text{J/m}^3$  ;  $K_2 \ll K_1$   
Ni ;  $K_1=-0.55 \cdot 10^4 \text{J/m}^3$  ;  $K_2=-0.24 \cdot 10^3 \text{J/m}^3$
- ◆ Interprétation des courbes d'aimantation observées sur le fer (les axes faciles sont  $\langle 100 \rangle$ )
  - $H // \langle 100 \rangle$  uniquement déplacement de parois



## Comportement expérimental

### ■ $H // \langle 110 \rangle$ plus



- ◆ Un seul axe est privilégié : l'axe c. Les directions z et -z étant équivalentes, on doit avoir des puissances paires. L'énergie prend la forme :

$$E_{MC} = K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta + \dots$$

- ◆ Si  $K_1 \geq 0$  et  $K_2 \geq -K_1$ , l'énergie est minimum pour  $\theta=0$ . L'axe c est l'axe de facile aimantation.
- ◆ Exemple : Co ;  $K_1=41.2 \cdot 10^4 \text{J/m}^3$  ;  $K_2=14.3 \cdot 10^4 \text{J/m}^3$

- ◆ A l'intérieur d'un matériau magnétique, l'existence du champ démagnétisant (voir chapitre 1) est responsable de l'anisotropie de forme. Si le matériau est de forme allongée, il est plus facile de l'aimanter le long de son grand axe.

$$\vec{H}_d = -\overline{N}_d \vec{M}$$

- ◆ L'énergie du système s'écrit donc :

$$E_{AF} = -\frac{1}{2} \vec{H}_d \cdot \vec{M} = \frac{1}{2} \overline{N}_d M^2$$

## Anisotropie dans les films ultra-minces

- ◆ Un film mince possède les anisotropies magnétiques déjà discutées. S'il est monocristallin, il aura une anisotropie magnétocristalline. Dans tous les cas, il y a une anisotropie de forme qui favorise une aimantation orientée dans le plan du film.

$$E_{AF} = \frac{1}{2} M_z^2 = \frac{1}{2} M^2 \cos^2 \mathbf{q}$$

- ◆ De plus, la brisure de symétrie à la surface du film (ou à son interface avec un autre composé) peut créer une forte anisotropie de surface (ou d'interface). L'énergie correspondant à cette anisotropie s'écrit :

$$E_{AS} = 2 \frac{K_s}{t} \sin^2 \mathbf{q}$$

Anisotropie magnétique

## Anisotropie dans les films ultra-minces

- ◆  $t$  est l'épaisseur du film. La dépendance en  $t^{-1}$  traduit l'importance de plus en plus grande jouée par les atomes de surface lorsque l'épaisseur diminue.
- ◆ Si l'on néglige l'anisotropie magnétocristalline, l'énergie totale du système s'écrit :

$$E = \frac{1}{2} M^2 \cos^2 \mathbf{q} + 2 \frac{K_s}{t} \sin^2 \mathbf{q} = \frac{1}{2} M^2 + K_{eff} \sin^2 \mathbf{q}$$

- ◆ Si  $K_{eff} < 0$ , soit  $t > t_c = \frac{4K_s}{M^2}$ , l'axe facile est dans le plan du film.
- ◆ Si  $K_{eff} > 0$ , soit  $t < t_c$ , l'axe facile est perpendiculaire au plan du film.

Anisotropie magnétique

## Anisotropie dans les films ultra-minces

- ◆ Exemples : Co/Pd(111)  $t_C=8\text{\AA}$   $K_S=0.26\text{mJ/m}^2$
- Co/Au(111)  $t_C=12\text{\AA}$   $K_S=0.6\text{mJ/m}^2$
- Fe/Ag(100)  $t_C=10\text{\AA}$   $K_S=0.8\text{mJ/m}^2$

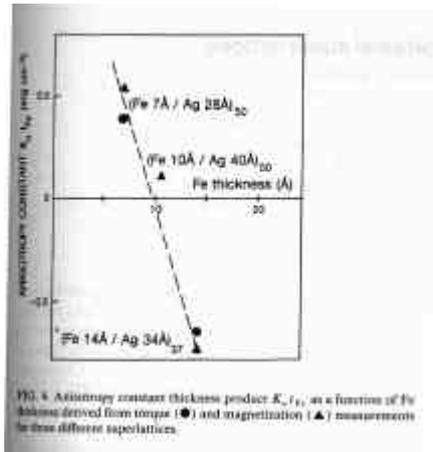


FIG. 4. Anisotropy constant (thickness product  $K_u t_C$ ) as a function of Fe thickness derived from torque (●) and magnetization (▲) measurements for three different superlattices.

Anisotropie magnétique