

L'enregistrement sur des nanostructures magnétiques

**Des nanostructures pour
l'enregistrement magnétique.**



O.Fruchart

Laboratoire Louis Néel (CNRS-UJF-INPG)
Grenoble



Laboratoire Louis Néel, Grenoble, France.

<http://lab-neel.grenoble.cnrs.fr/themes/couches/ext/slides/>

- **1. Quelques rappels sur le magnétisme**
- **2. Enregistrement magnétique:**
 - * **Historique**
 - * **Nouveaux effets pour les têtes**
 - * **Nouveaux effets pour le media**
 - * **Perspectives**
- **3. MRAMs: Mémoires magnétiques à accès aléatoire**
- **4. Perspectives et conclusion.**

1. Quelques rappels sur le magnétisme

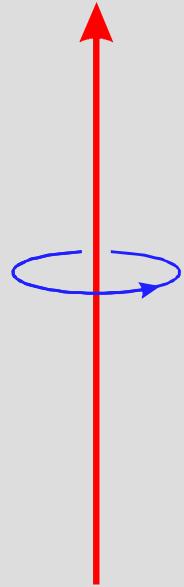
2. Enregistrement magnétique:

- * Historique
- * Nouveaux effets pour les têtes
- * Nouveaux effets pour le media
- * Perspectives

3. MRAMs: Mémoires magnétiques à accès aléatoire

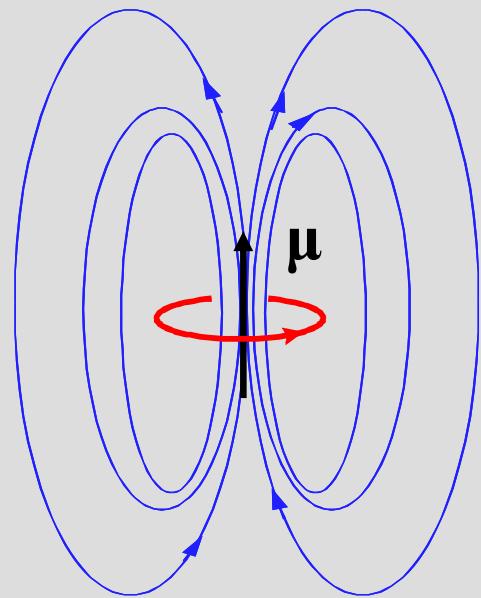
4. Perspectives et conclusion

Champ d'Oersted



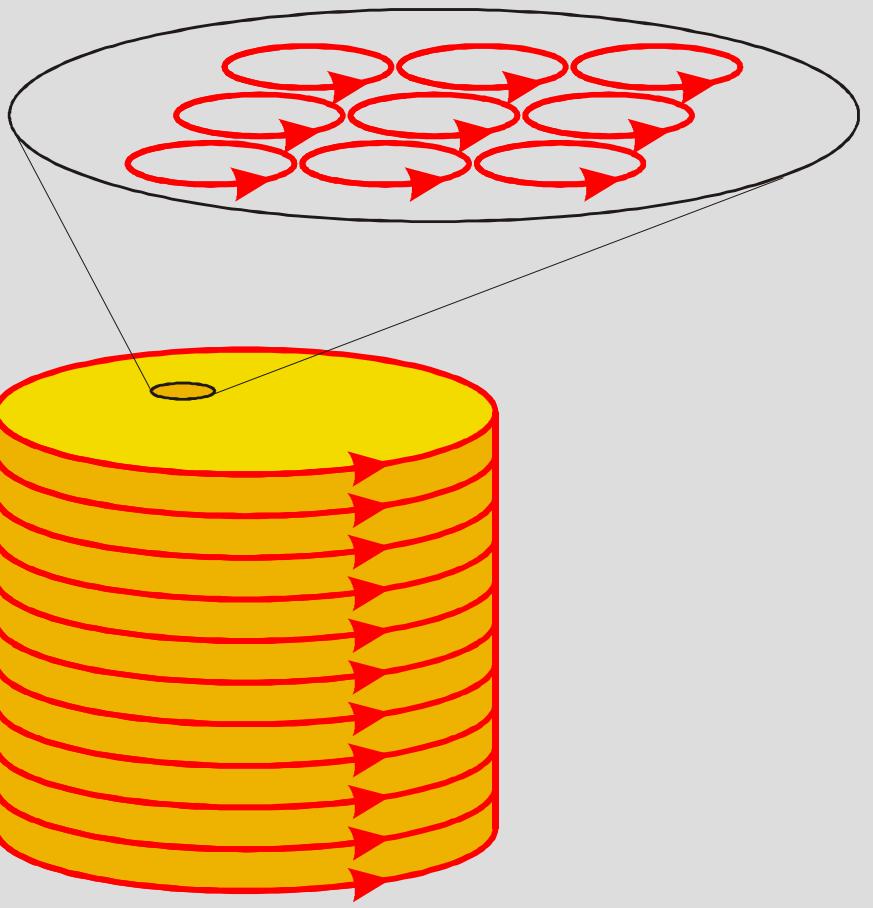
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

Moment magnétique



$$B = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} \times \left[\frac{3}{r^2} (\mu \cdot r) r - \mu \right]$$

Matériaux magnétiques



Aimantation: A.m⁻¹

Moment magnétique: A.m²

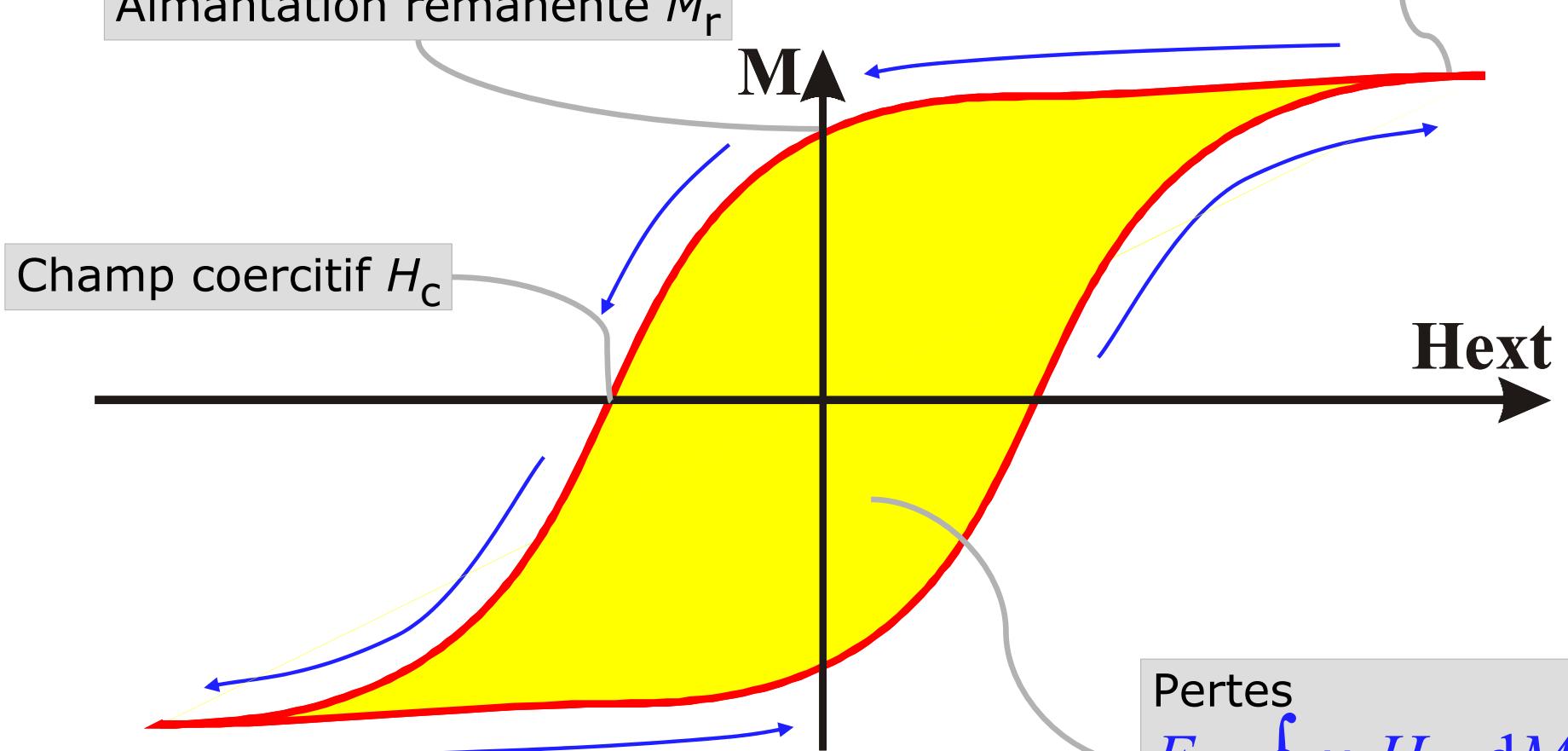
Manipulation des matériaux magnétiques:

↳ Application d'un champ magnétique

Énergie Zeeman: $E_Z = -\mu_0 \mathbf{H} \cdot \mathbf{M}$

Aimantation rémanente M_r

Aimantation spontanée M_s

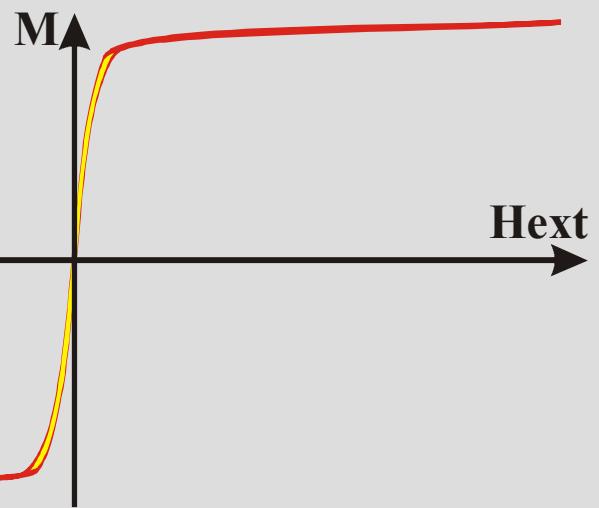


Pertes

$$E = \oint \mu_0 H_{ext} dM$$



Matériaux doux

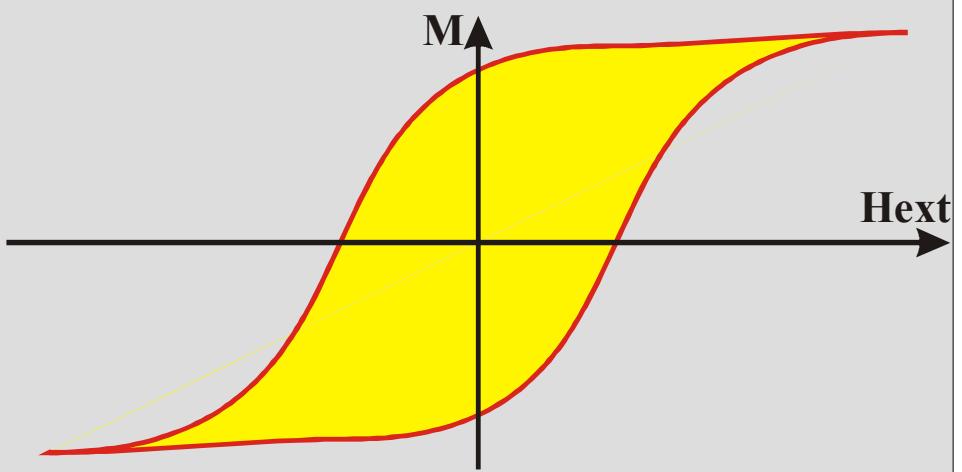


Transformateurs

Guides de flux

Blindage magnétique

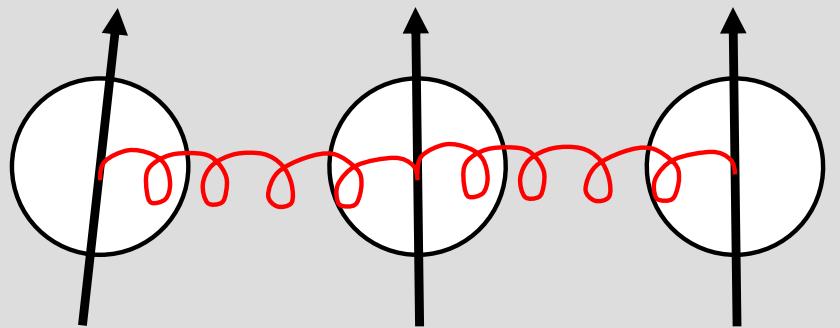
Matériaux durs



Aimants permanents, moteurs

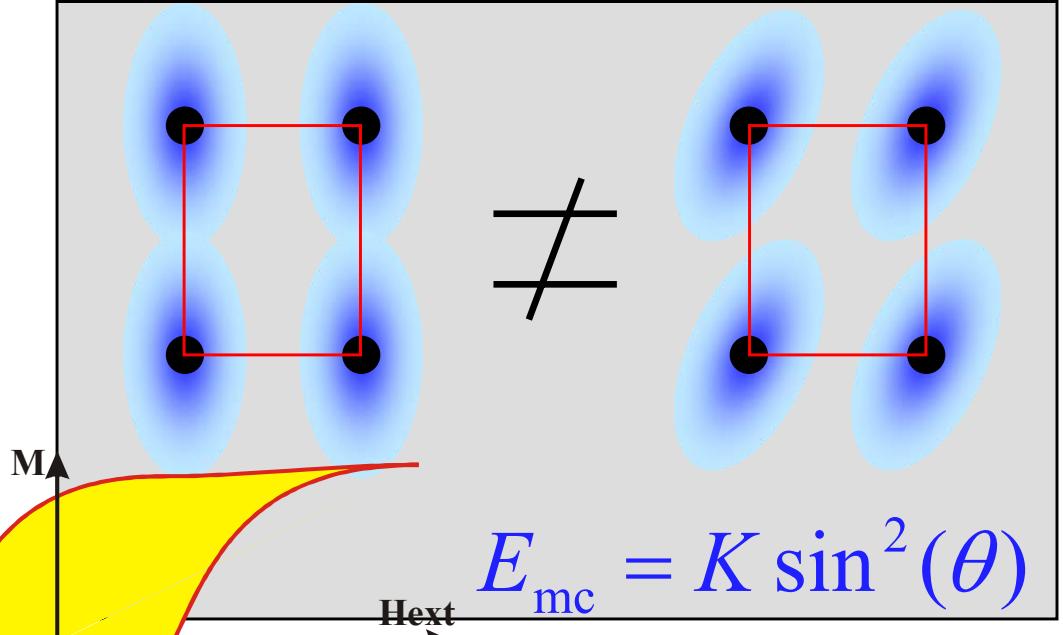
Enregistrement magnétique

Énergie d'échange

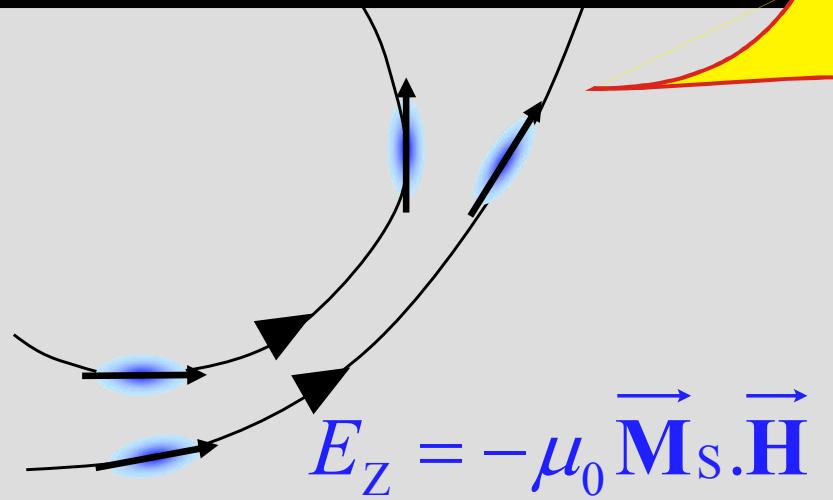


$$E_{\text{Ech}} = -J_{1,2} \vec{\mathbf{S}}_1 \cdot \vec{\mathbf{S}}_2 \\ = A(\nabla \theta)^2$$

Énergie d'anisotropie magnétocristalline



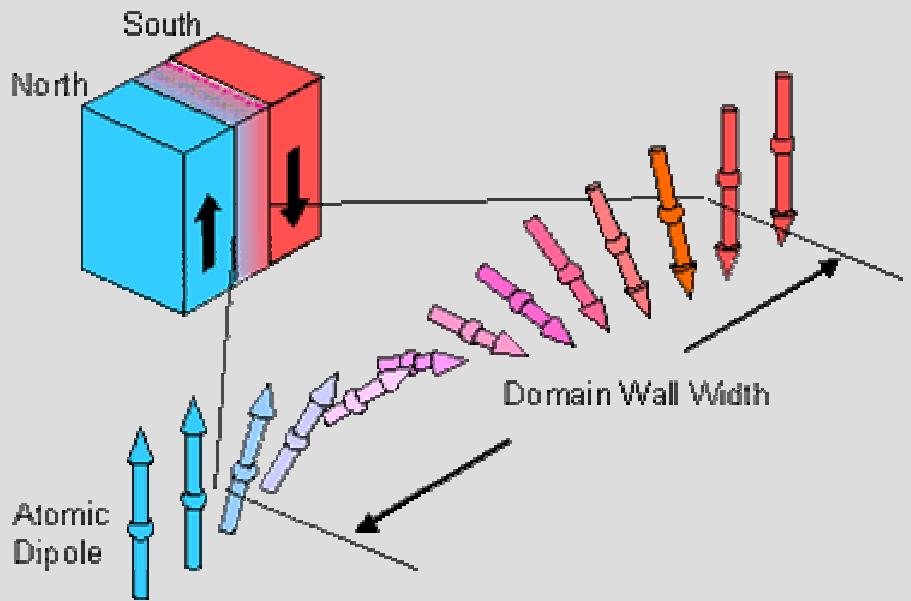
Énergie Zeeman



Laboratoire Louis Néel, Grenoble, France.

Olivier Fruchart – Exposé SFP/UDPPC – 23 mars 2005 – p.7

Une longueur caractéristique: largeur de paroi de Bloch λ_B



$$e = A(d\theta / dx)^2 + K \sin^2 \theta$$

Échange
→ J/m

Anisotropie
→ J/m³

Valeurs numériques

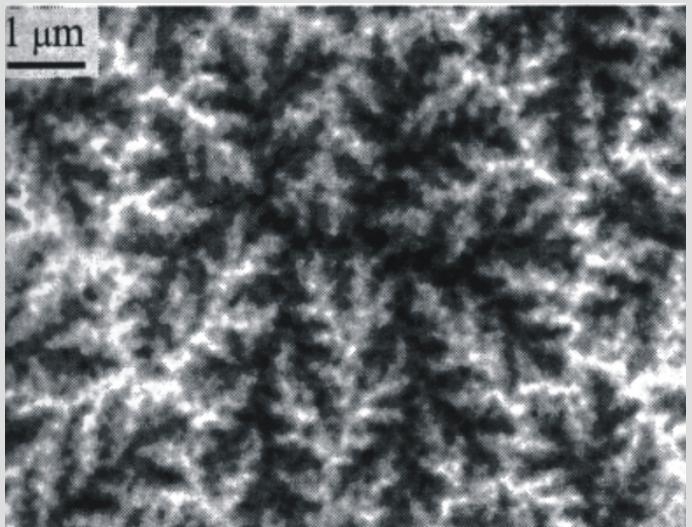
$$\lambda_B = \pi \sqrt{A / K}$$

$$\lambda_B = 1\text{nm} \xrightarrow{\text{Dur}} \lambda_B = 100\text{nm} \xrightarrow{\text{Doux}}$$

Définition: magnétisme mésoscopique

Matériau massif

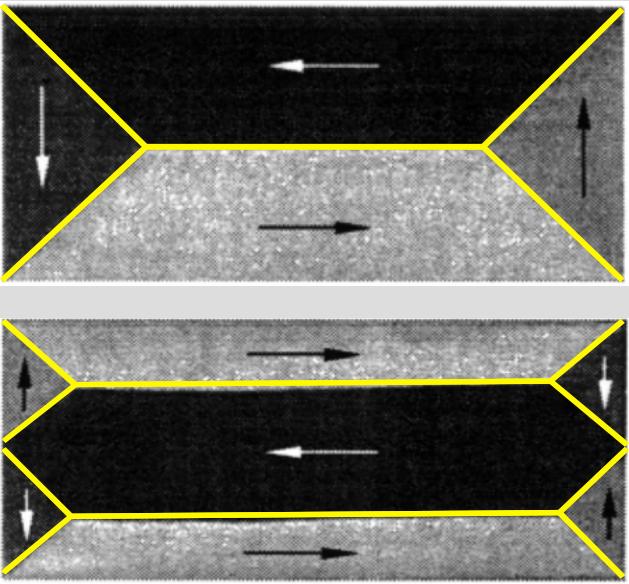
Domaines nombreux et complexes



Cristal de Co(1000) - SEMPA
A. Hubert, *Magnetic domains*

Échelle mésoscopique

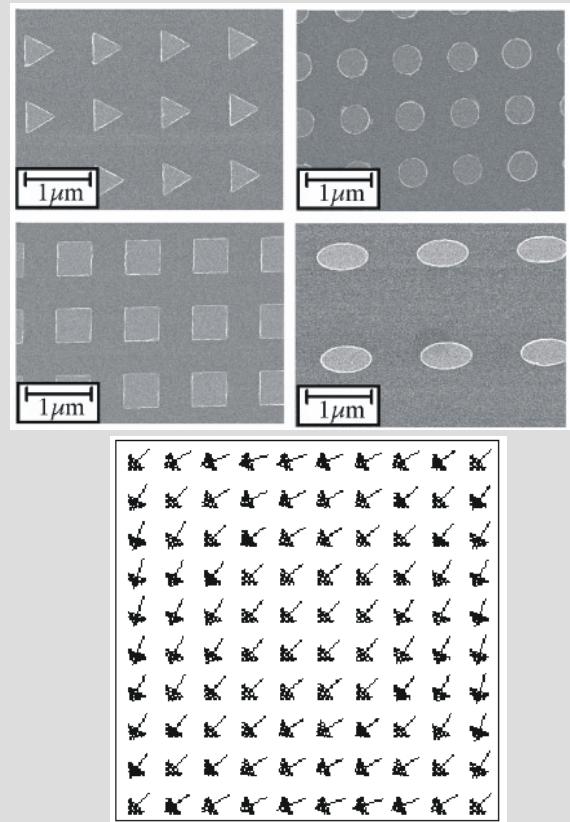
Petit nombre de domaines, de forme simple



Plots lithographiés microniques
Effet Kerr
A. Hubert, *Magnetic domains*

Échelle nanométrique

Monodomaine magnétique



R.P. Cowburn,
J.Phys.D:Appl.Phys.33,
R1 (2000)

L'enregistrement magnétique utilise essentiellement des monodomains magnétiques

1. Quelques rappels sur le magnétisme

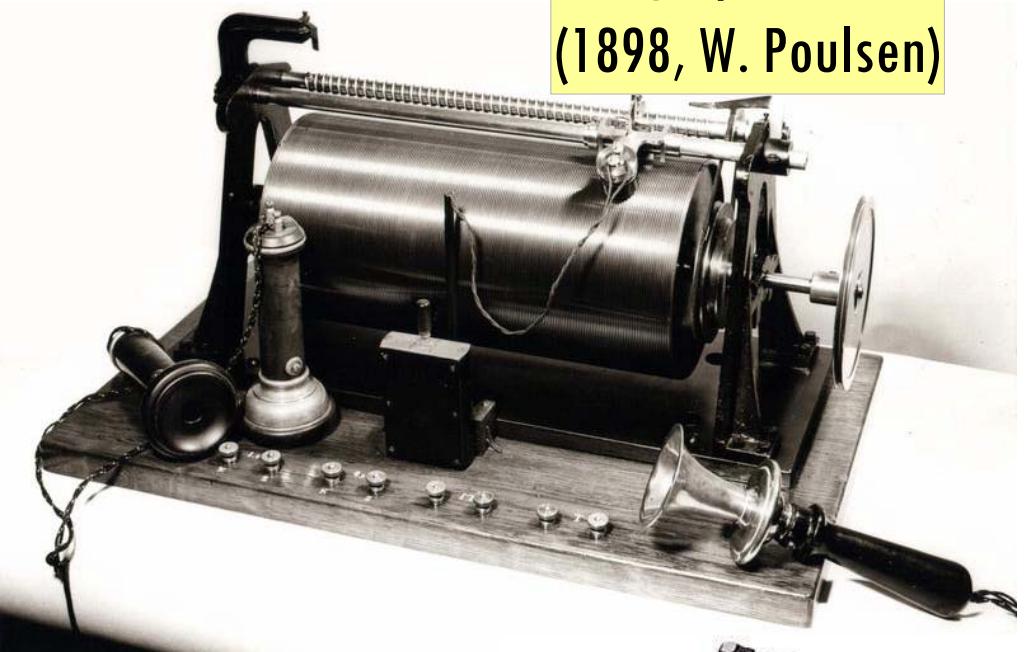
2. Enregistrement magnétique:

- * Historique
- * Nouveaux effets pour les têtes
- * Nouveaux effets pour le media
- * Perspectives

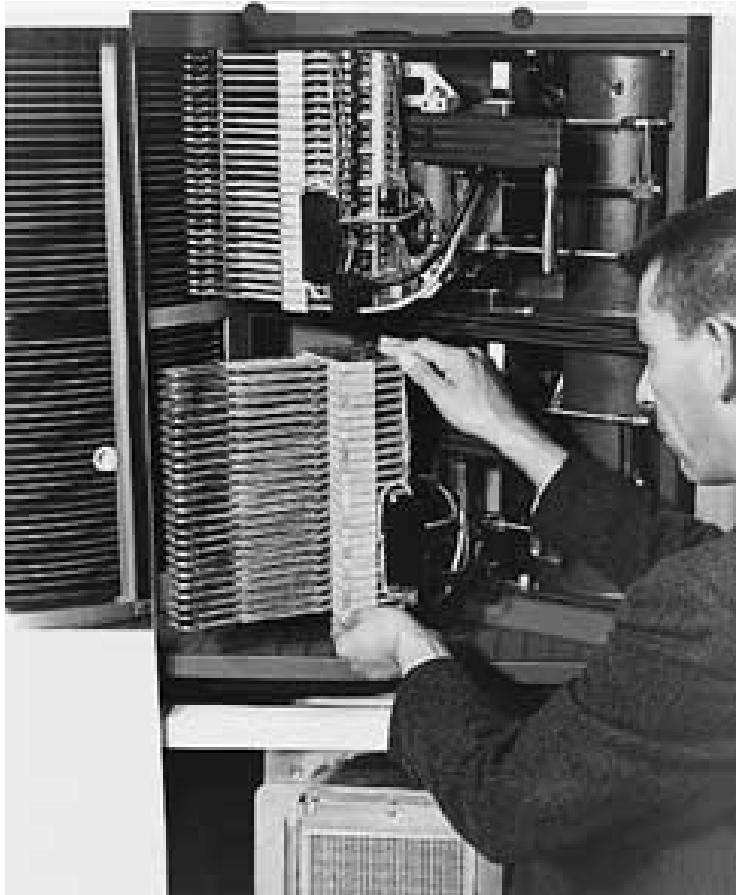
3. MRAMs: Mémoires magnétiques à accès aléatoire

4. Perspectives et conclusion

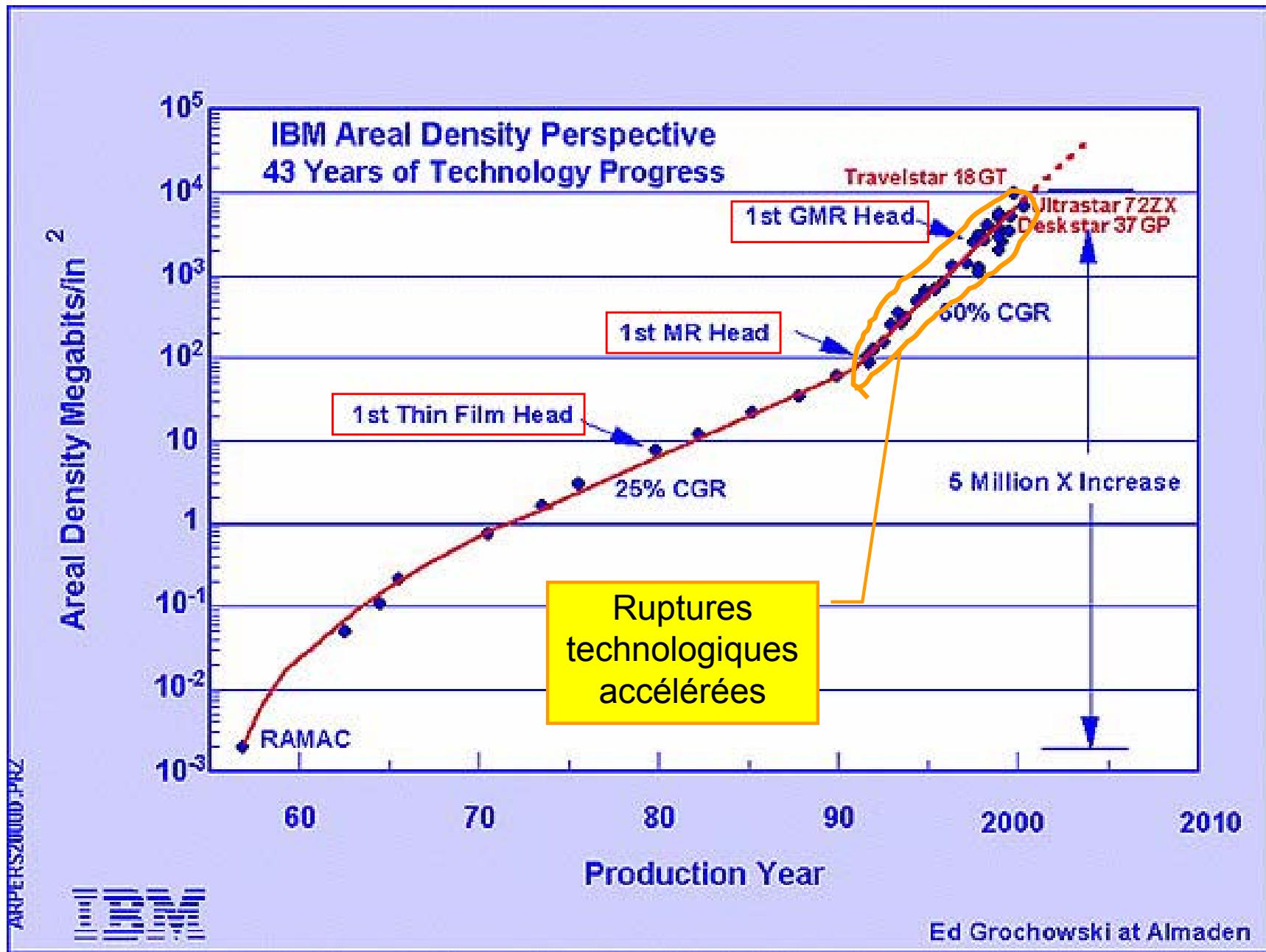
Télégraphone
(1898, W. Poulsen)



Disque dur actuel
(>200Go)

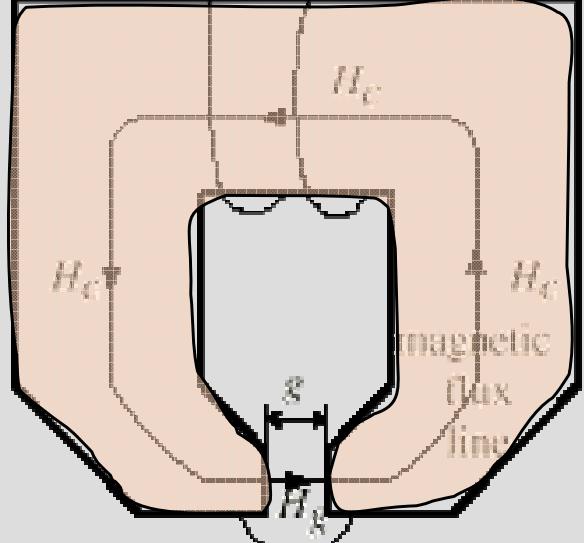


RAMAC (IBM, 1956)
2 kbit/in²
50 disques Ø 60 cm
Total 5Mo



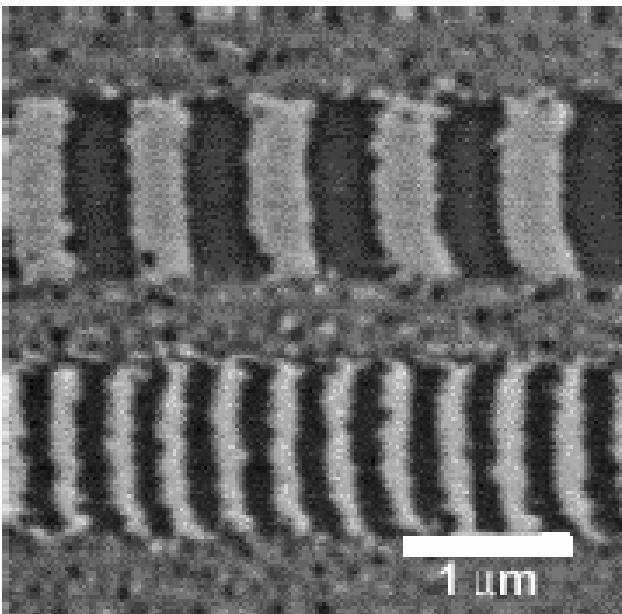
Principe du stockage

Tête d'écriture

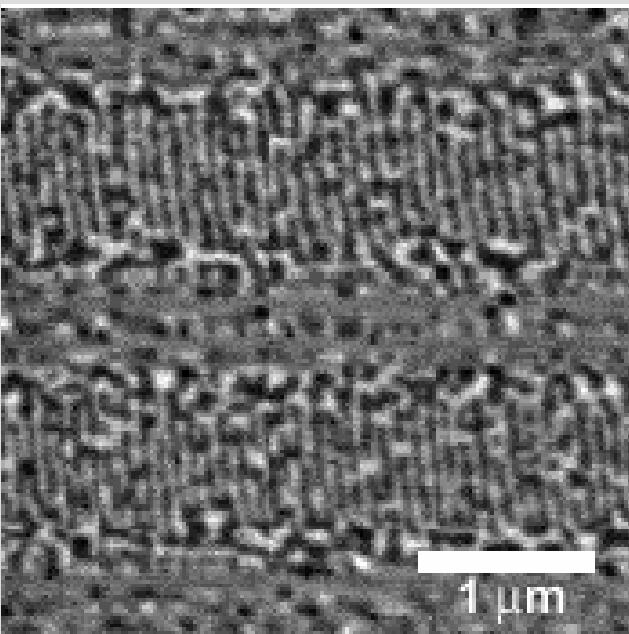


Vue en coupe du disque dur

Vue du disque dur



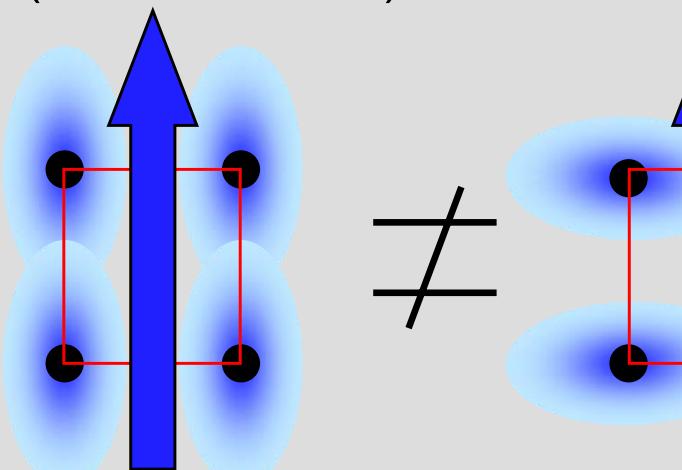
1 μm



1 μm

Principe

Couplage spin-orbite
(effet relativiste)



Noter: propriété de matériau

Spécificités

$$\Delta R \propto \cos^2(\theta)$$

Géométrie: simple (1 monodomaine)

Amplitude: $\sim 1\%$

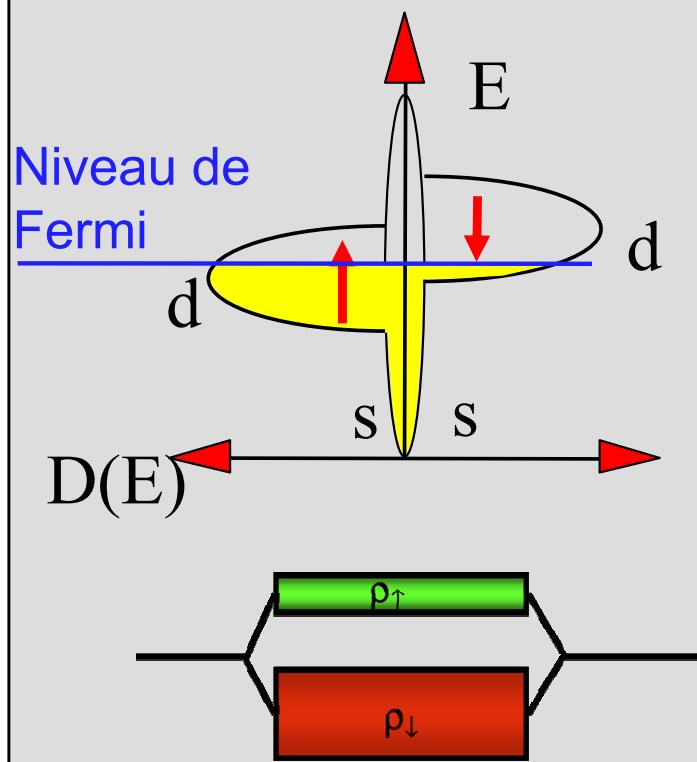
Utilisations

Capteur de champ magnétique

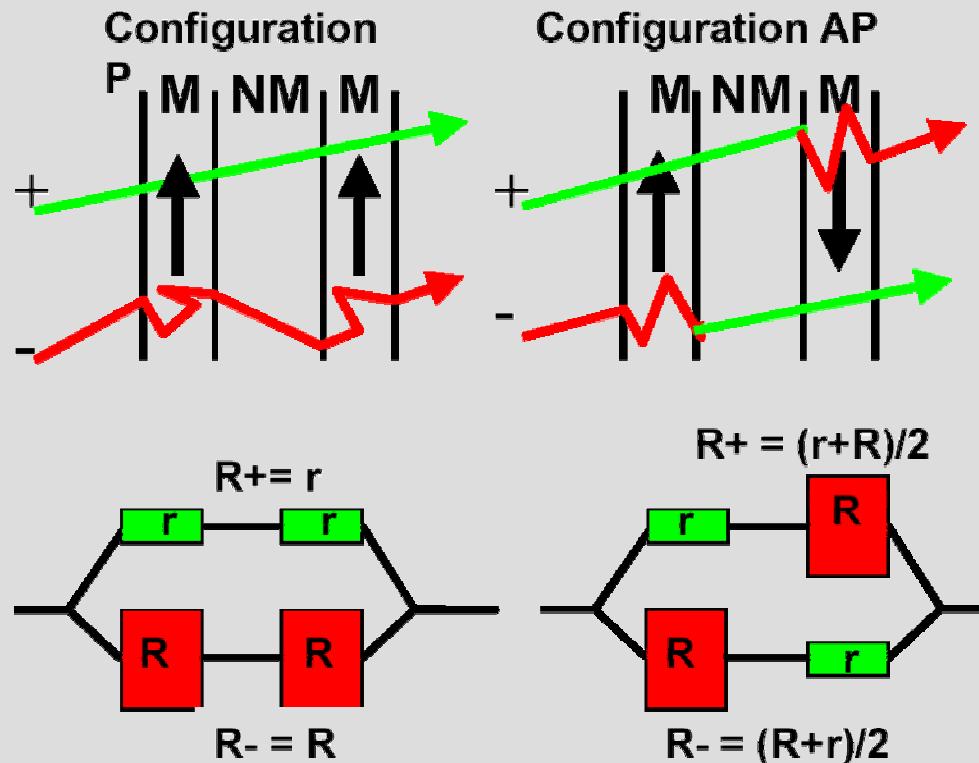
- Tête de lecture de disque dur (1990)
- Compas électronique
- etc.

Principe

Découverte: 1988, groupes A. Fert (CNRS-Thalès) et P. Grünberg (Jülich)

Filtrage de spin dans une hétérostructure

➡ Deux canaux de conduction parallèles ➡ Effet quantique



Spécificités

$$\Delta R \propto \cos(\theta)$$

Géométrie: multicouche

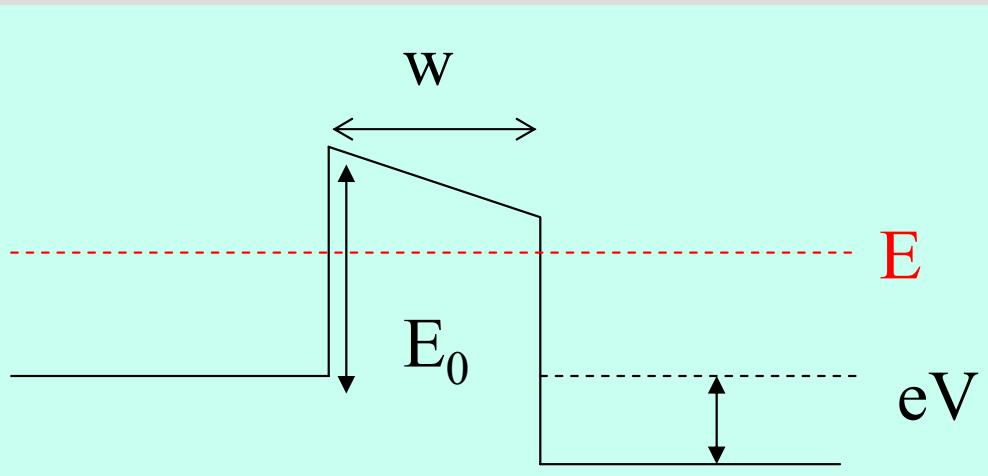
Amplitude: $\leq 40-50\%$

Utilisations

- Capteurs magnétiques: tête de lecture de disque dur (1998) etc.
- Mémoire magnétique

Principe**Découverte: 1975 (Jullière); réactualisation en 1995, Moodera et coll.**

- Filtrage de spin dans une hétérostructure
- Effet tunnel entre deux électrodes



- Mécanique classique: pas de courant
- Mécanique quantique: courant tunnel

Équation de Schrödinger

⇒ **Effet quantique**

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} |\psi\rangle + V(x) |\psi\rangle = E |\psi\rangle$$

**Spécificités**

$$\Delta R \propto \cos(\theta)$$

Géométrie: multicoucheAmplitude: $\leq 100\text{-}150\%$ Forte résistanceCouche ultramince d'oxyde**Utilisations possibles**

- Capteurs magnétiques
- Mémoire magnétique

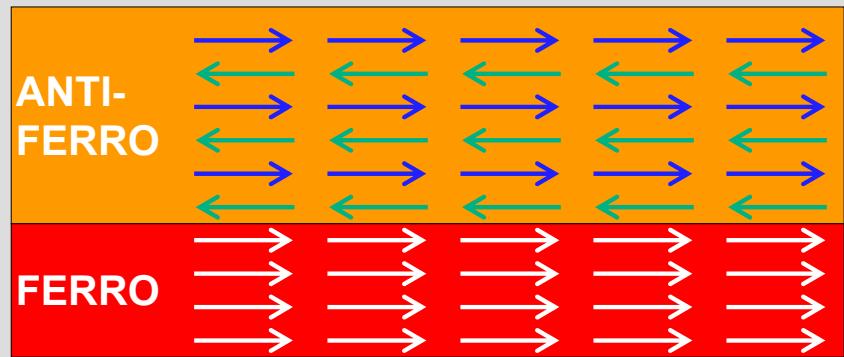
Principe de la vanne de spin

Couche libre et couche piégée



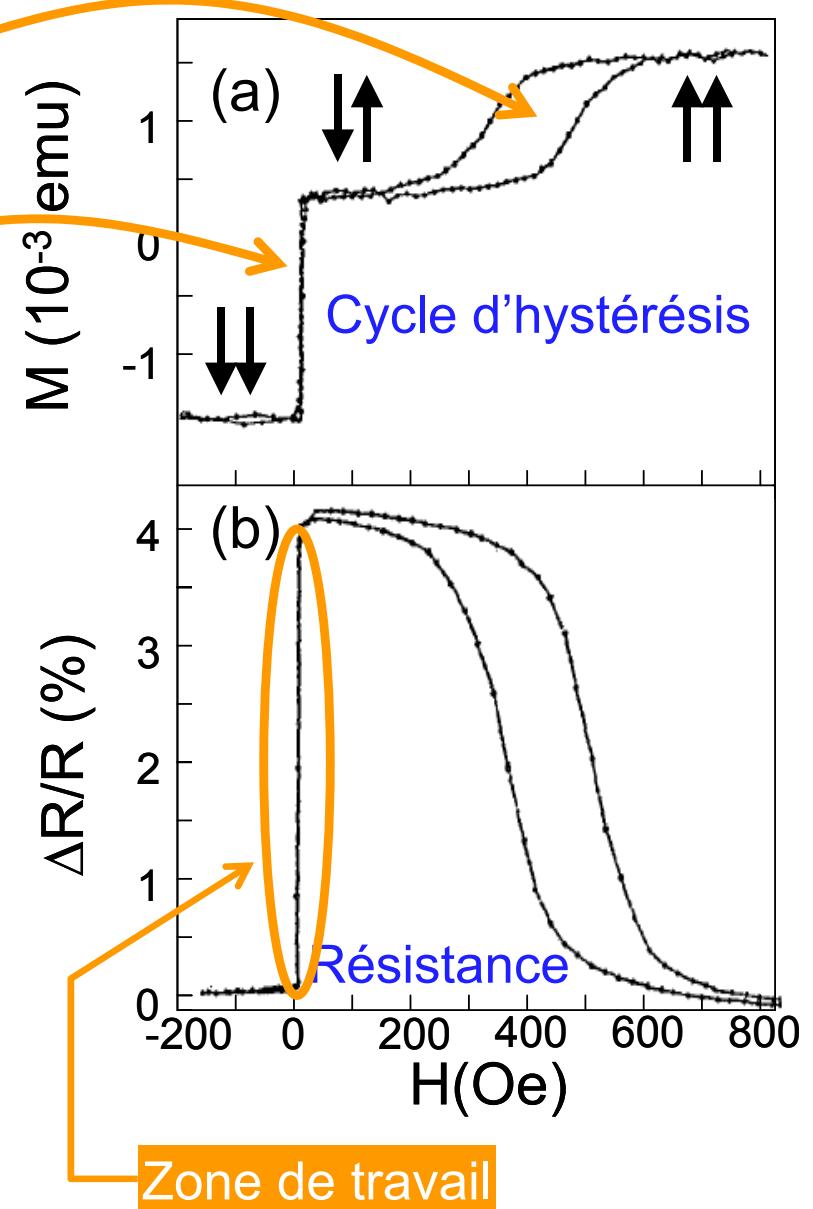
Principe du piégeage

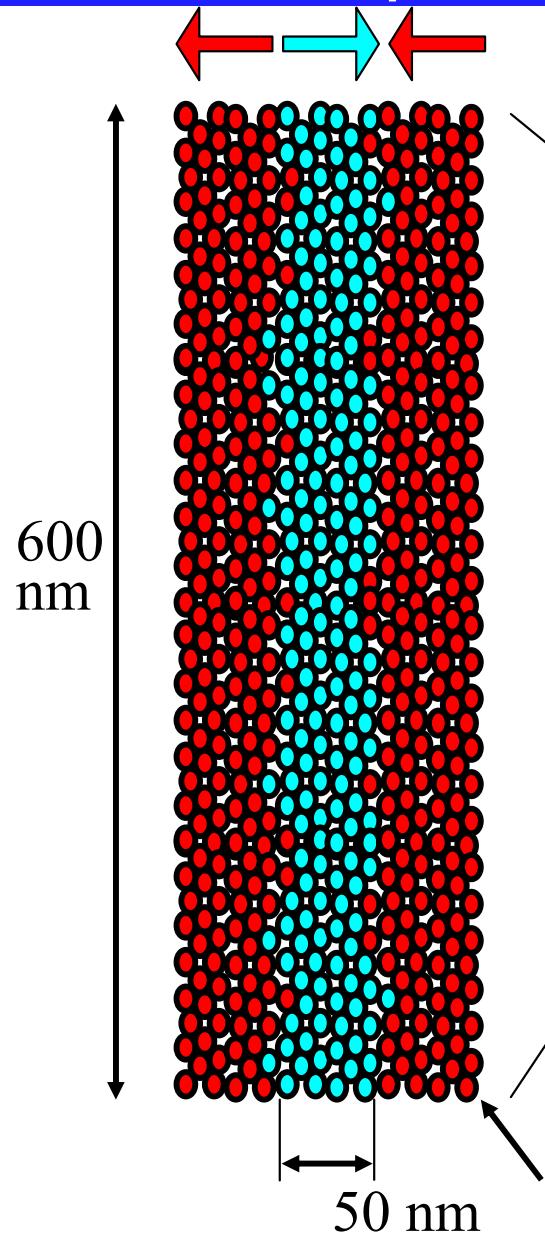
Couplage d'échange ferromagnétique/antiferromagnétique



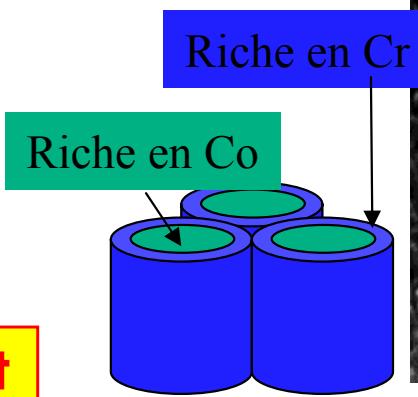
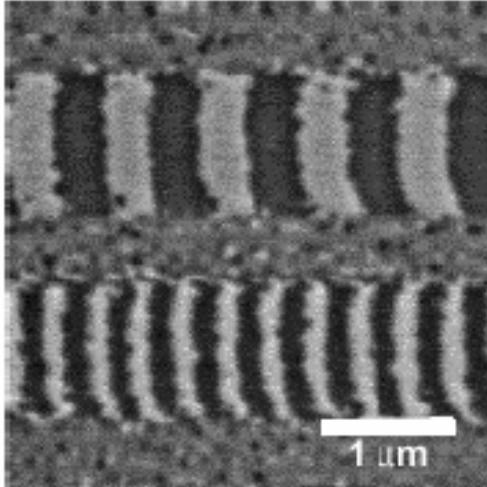
- ❖ Augmentation de coercitivité
- ❖ Décalage des cycles d'hystérésis

B.Dieny, V.S.Speriosu, et coll.
IBM Almaden



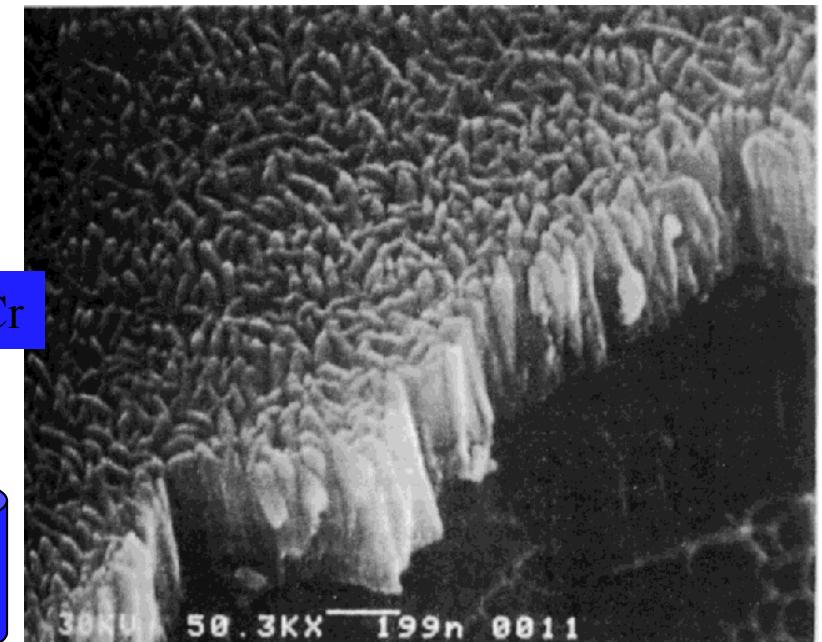


Principe du media granulaire

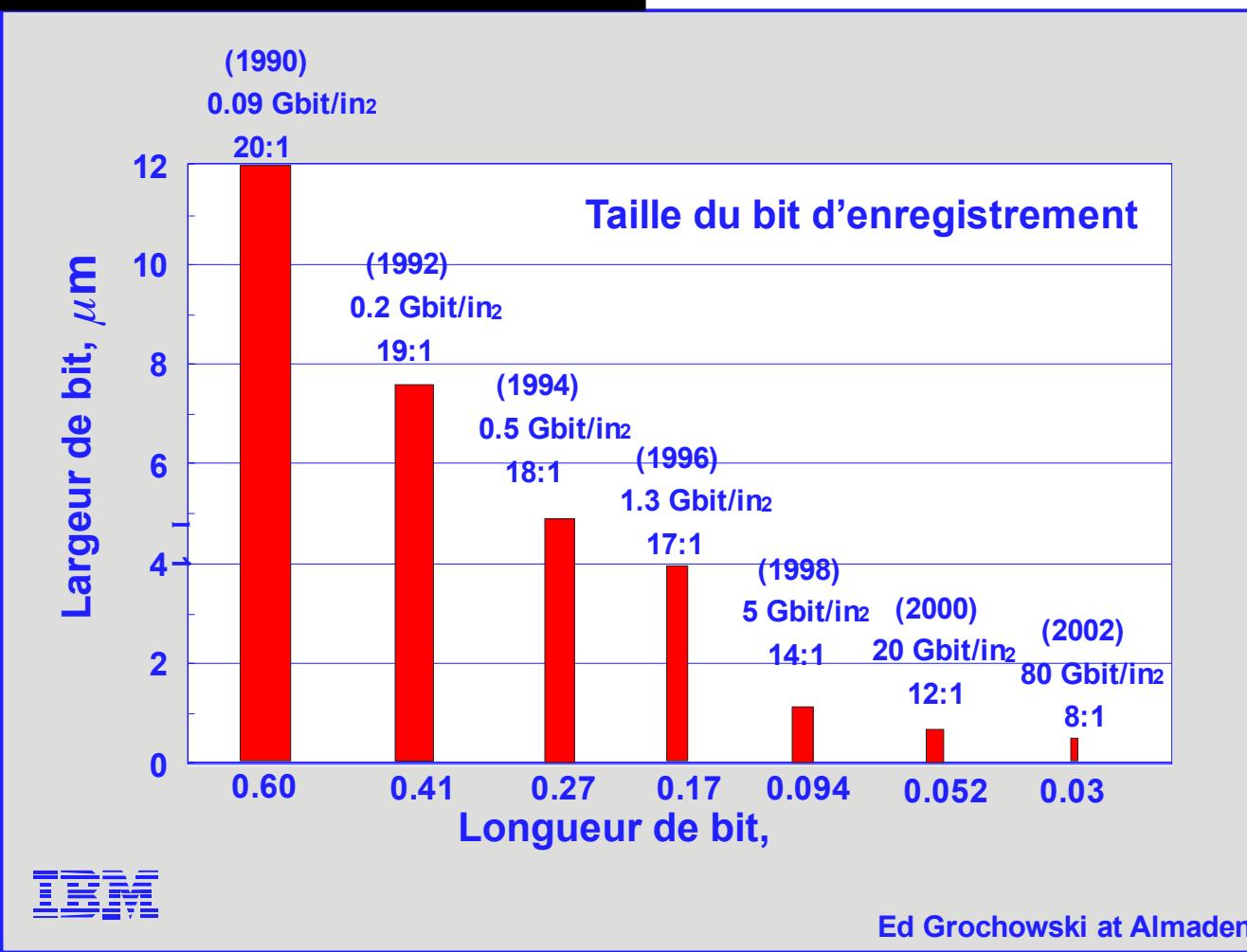


Grand nombre de grains par bit

Grain : 10 nm

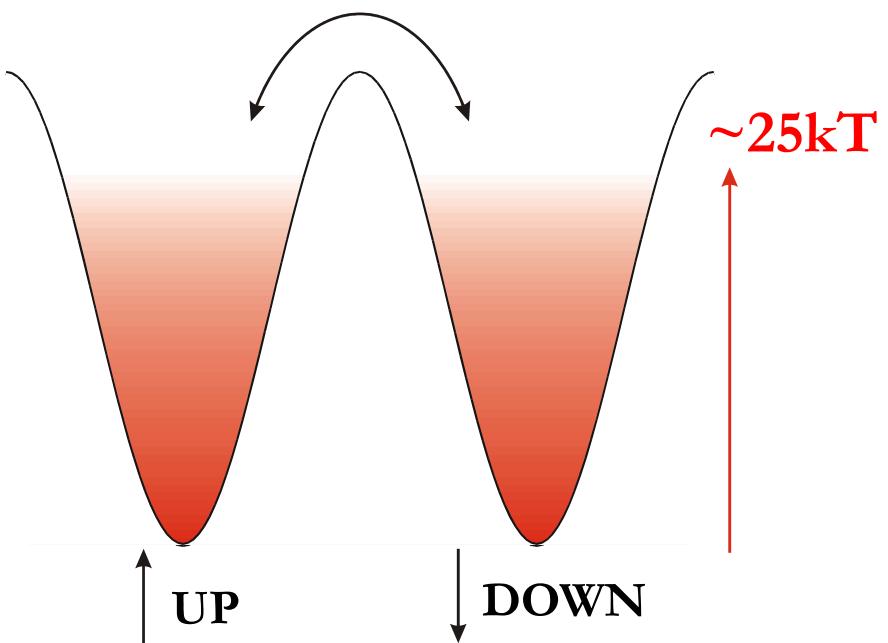


Taille du bit d'enregistrement



La préservation du rapport signal / bruit impose de diminuer également la taille des grains individuels
Cela pose-t'il problème?

Barrière d'anisotropie



Barrière d'anisotropie $E_B \sim kV$

Description de l'agitation thermique

Modèle phénoménologique

Brown, Phys.Rev.130, 1677 (1963)

- Probabilité de non renversement

$$P(t) = e^{-t/\tau}$$

- Temps de renversement moyen

$$\tau = \tau_0 e^{E_B / k_B T} \quad \tau_0 \approx 10^{-9} \text{ s}$$

- Barrière nécessaire pour résister au renversement durant le temps t

$$E_B = k_B T \ln(t / \tau_0)$$

Ordres de grandeur

Laboratoire : $t=1\text{s}$

$$V_B \approx 25 k_B T / K$$

Enregistrement : $t \gg 10^9 \text{s}$ $V_B \approx 60 k_B T / K$

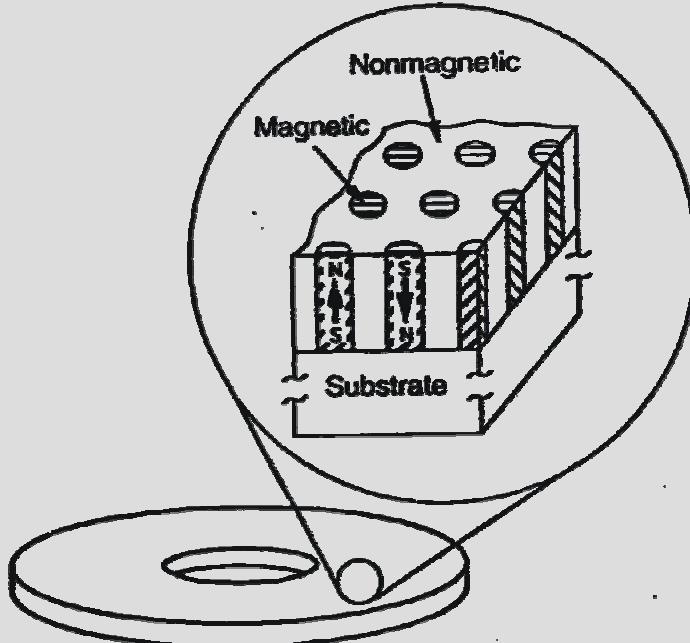
L'enregistrement avec un grain par bit ($V=V_B$, media discret) serait plus favorable que $V=N V_B$

Proposition de media discret

1994 (S. Chou et coll.)

Avantage: 1 grain par bit

↳ deux ordres de grandeur de densité gagnés



Dépôt électrolytique de Ni
dans un réseau de trous (lithographie)

↳ **Stimulation de la
recherche fondamentale**

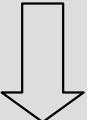
Propriétés requises

- Faible distribution de propriétés de grain à grain
- Media plat préférable.
- Bas coût

Dépôts sur surfaces Si prégravées

CEA-Grenoble: Spintec/DRFMC/LETI (B. Diény et coll.)

Co,Pt



Bit

Tests écriture-lecture

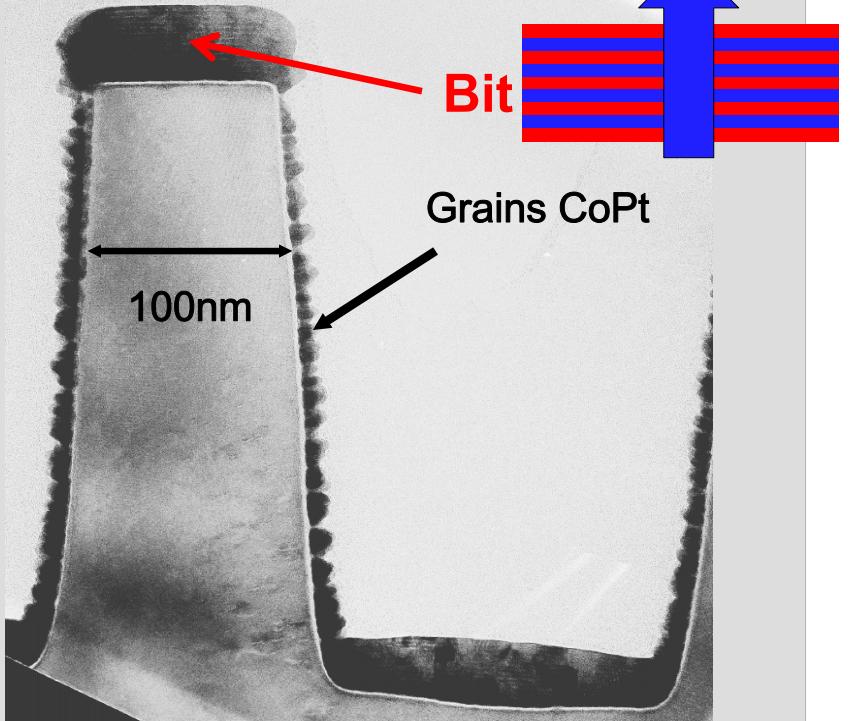
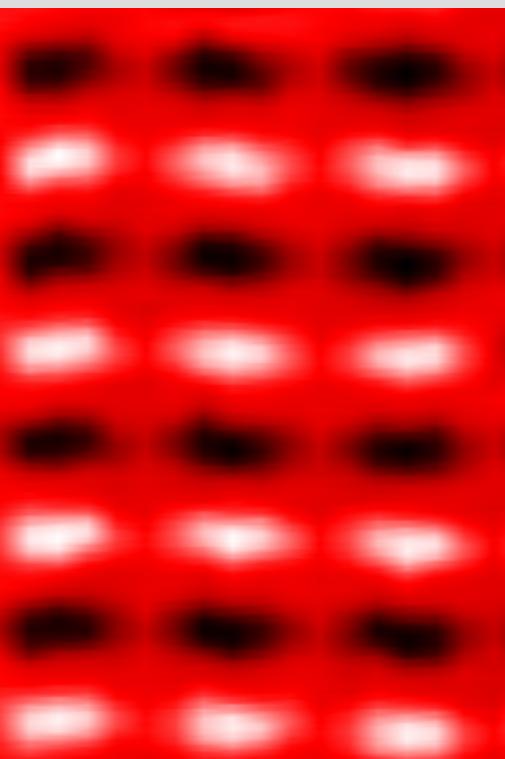
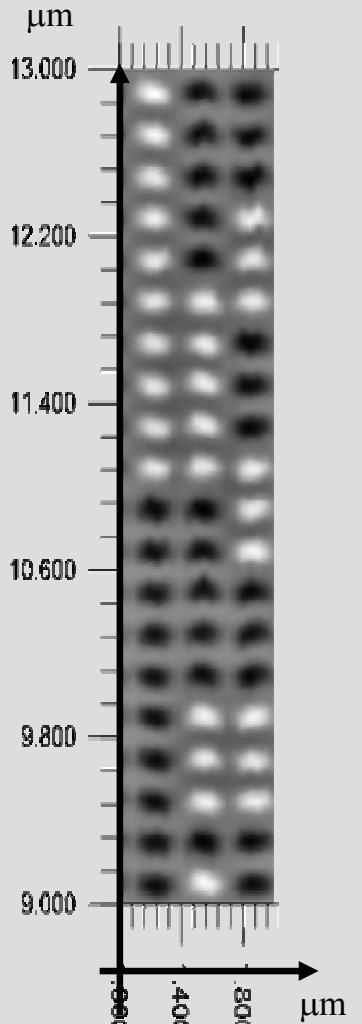
Utilisation d'une tête
lecture-écriture
commerciale

Image TEM d'un réseau de Si couvert
d'une multicouche Co/Pt.
Largeur 100nm ; hauteur 300 nm



Remarque : aimantation perpendiculaire



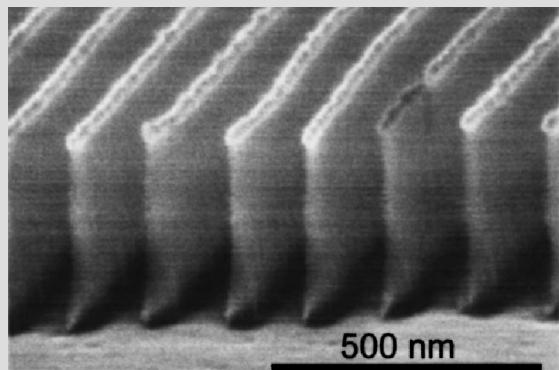
↳ Faible distribution de propriétés magnétiques / Coût modéré (nanomoulage)

Discrétisation par irradiation

LPS-Orsay, IEF-Orsay (J. Ferré, C. Chappert, H. Barnas et coll.)

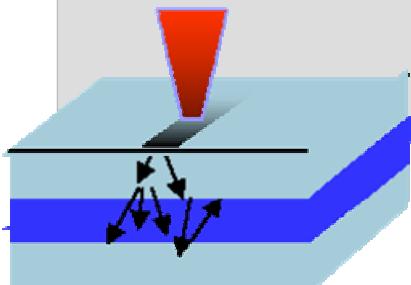
Principe: modification locale de l'anisotropie, voire même paramagnétisme.

↳ Bits découplés (Pt/Co/Pt)

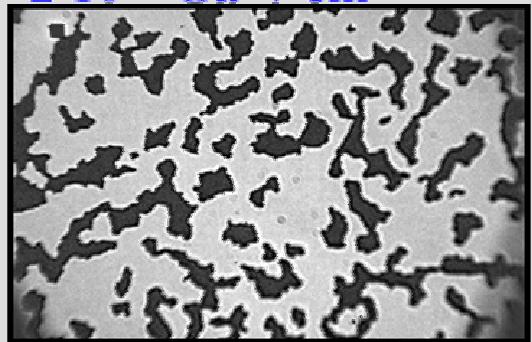


Masque d'irradiation

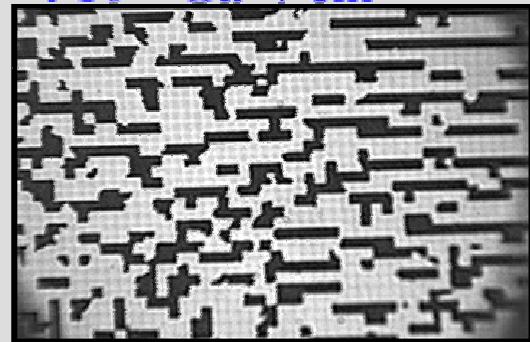
25 keV Ga^+ ion



$2 \cdot 10^{13} \text{ Ga}^+ / \text{cm}^2$

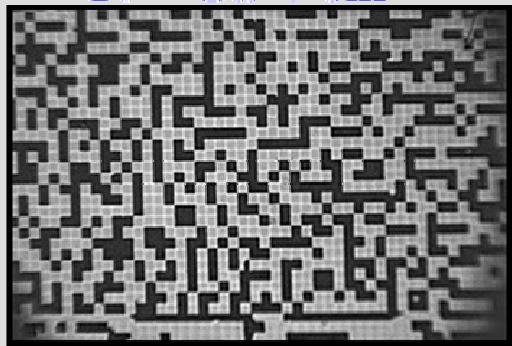


$4 \cdot 10^{14} \text{ Ga}^+ / \text{cm}^2$

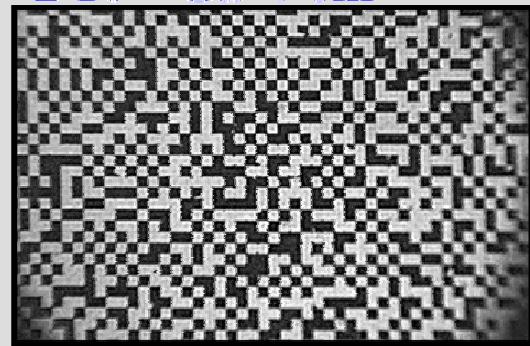


↳ Virgin film behavior: large $\uparrow \downarrow$ domains

$10^{15} \text{ Ga}^+ / \text{cm}^2$



$2 \cdot 10^{16} \text{ Ga}^+ / \text{cm}^2$



↳ Pattern of dots in dipolar interaction

- ↳ Faible distribution de propriétés magnétiques
- ↳ Surface plane
- ↳ Coût modéré (lithographie par réplication)

Conclusion (personnelle) sur les media discrets

- ↳ Développé dans les années 1995-2005
- ↳ Pertinent en 1995, est maintenant rattrapé par enregistrement conventionnel
- ↳ Trop coûteux, et nécessiterait changement de technologie:
peu rentable par rapport au gain escompté.

Quid des recherches fondamentales menées?

- ↳ A stimulé progrès en fabrication, caractérisation etc.
- ↳ Expertise en nanomagnétisme > appliqué à autres domaines, dont media continus
Exemple: Mémoires Magnétiques solides MRAMs.

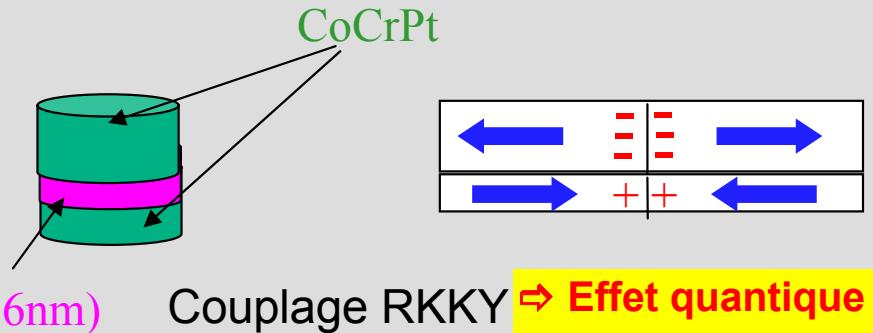
Quel futur pour les disques durs?

- ↳ Nouveaux types de media granulaires
- ↳ Arrêt prévisible des progrès, vers 1-10 Tbit/in² (~5ans)

Grains antiferromagnétiques synthétiques

Fullerton et al. APL 2001 / Disques durs en 2001

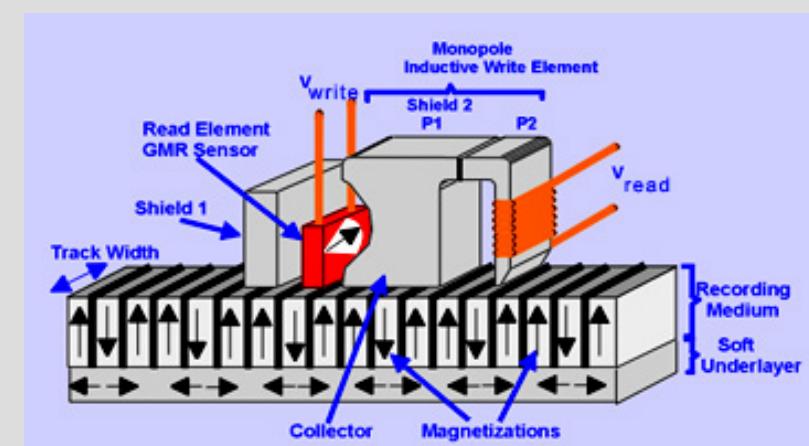
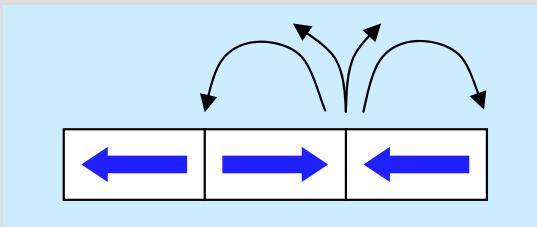
- 😊 Champs dipolaires inter-grains réduits
- 😊 Signal de lecture faiblement réduit
- 😊 Volume inchangé, donc KV également.



Grains à aimantation perpendiculaire

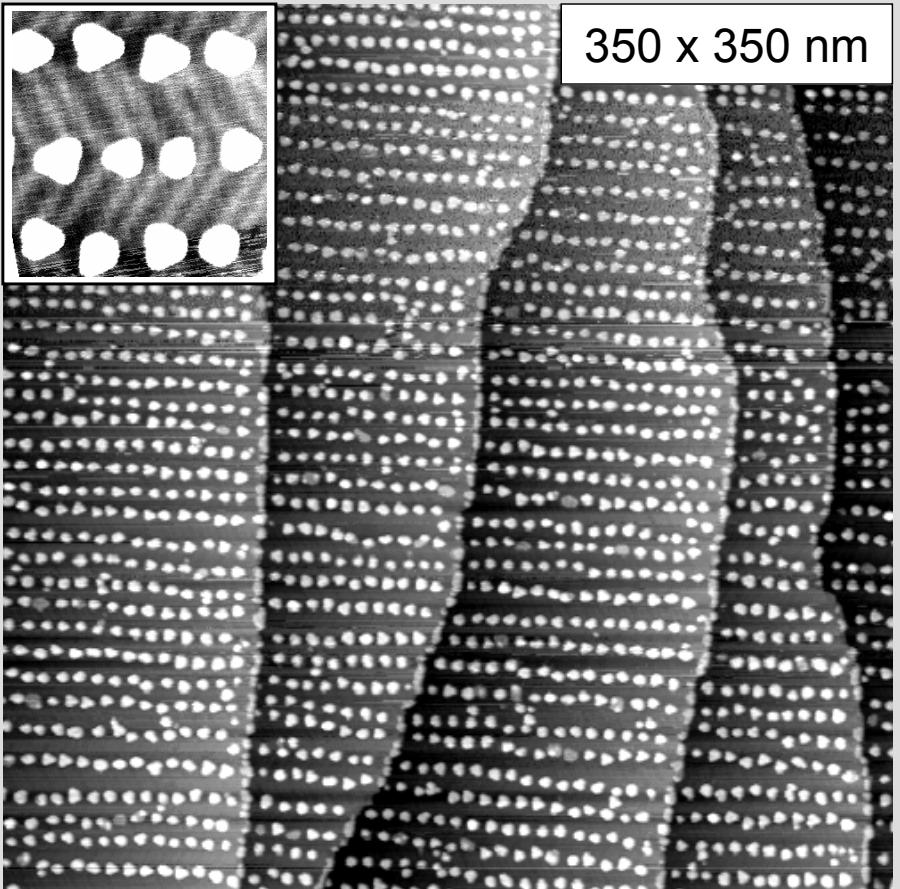
- 😊 Plus favorable pour les champs dipolaires internes.
- 😊 Couches plus épaisses admises.
- 😊 Signal de lecture plus important.
- 😢 Nouveau concept de tête d'écriture; nécessite sous-couche douce.

Il n'y a pas de petites économies !



Ordre et monodispersion

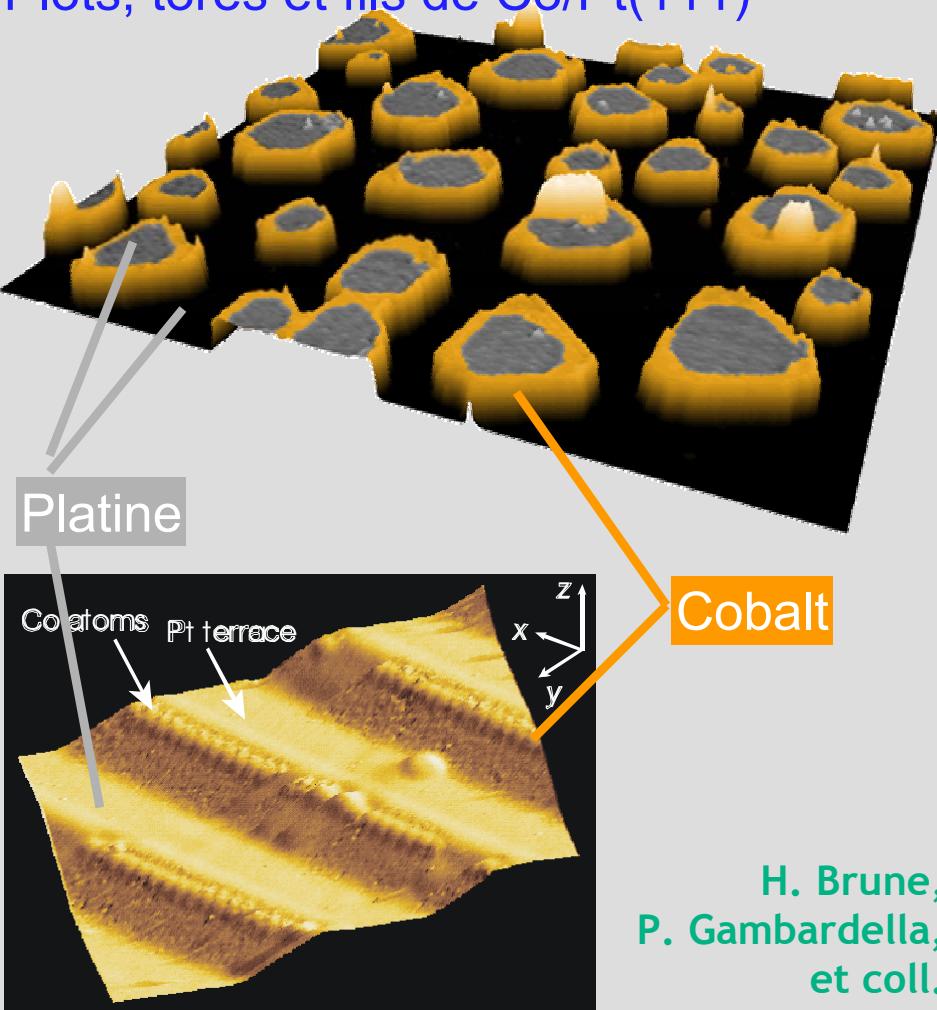
Plots de Co/Au(111)



O. Fruchart et coll.

Ingénierie de l'anisotropie magnétique

Plots, tores et fils de Co/Pt(111)

H. Brune,
P. Gambardella,
et coll.

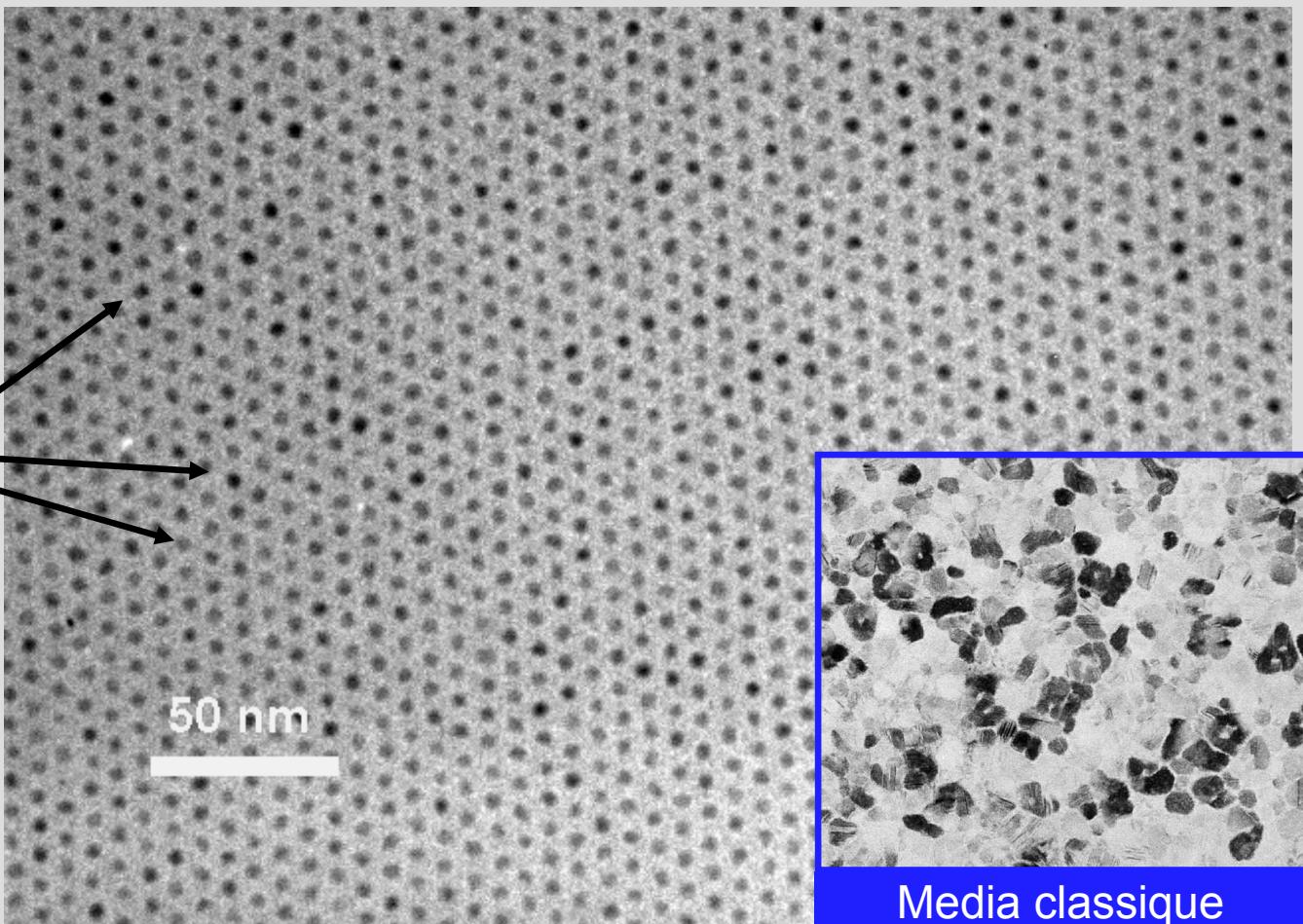
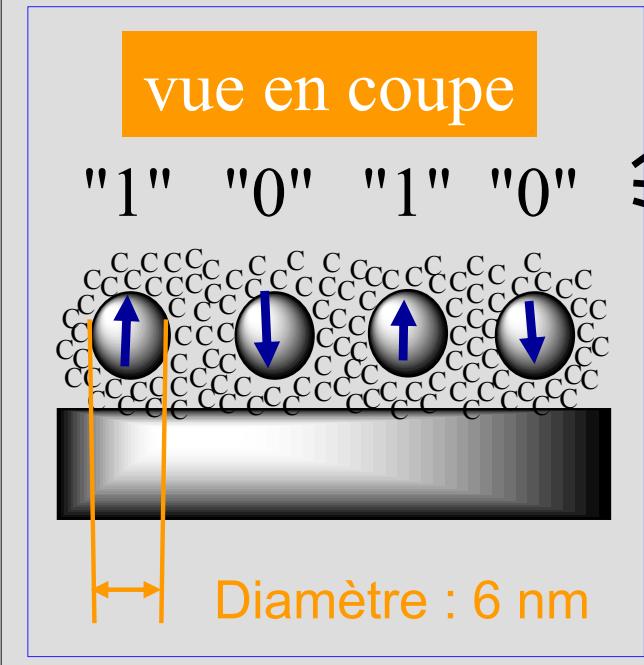
😊 Nouvelle physique (croissance / magnétisme)

😢 Peu réaliste pour l'enregistrement (coût)

Nanoparticules par voie chimique, étalées sur disque

Nanoparticules d'alliage FePt
dans une matrice organique

(Densité recherchée : Tbit/in²)



Points forts

- ↳ Coût modéré
- ↳ Compatible avec techno existante
- ↳ Faible distribution de taille, et ordre.

Points faibles

- ↳ Aimantation effective faible
- ↳ Ordre à moyenne distance
- ↳ Axes d'anisotropie distribués

1. Quelques rappels sur le magnétisme

2. Enregistrement magnétique:

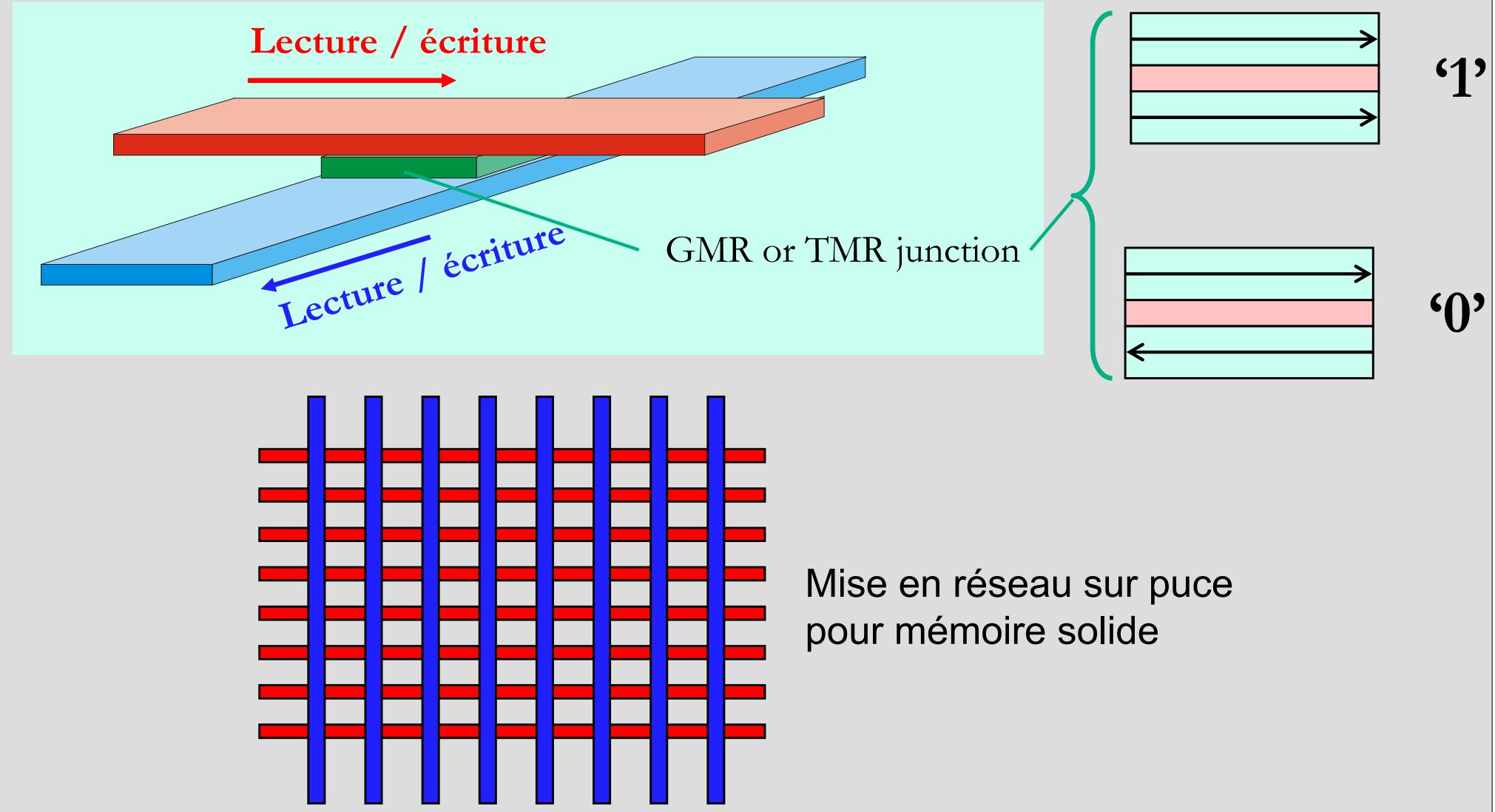
- * Historique
- * Nouveaux effets pour les têtes
- * Nouveaux effets pour le media
- * Perspectives

3. MRAMs: Mémoires magnétiques à accès aléatoire

4. Perspectives et conclusion

MRAM = Magnetic Random Access Memory

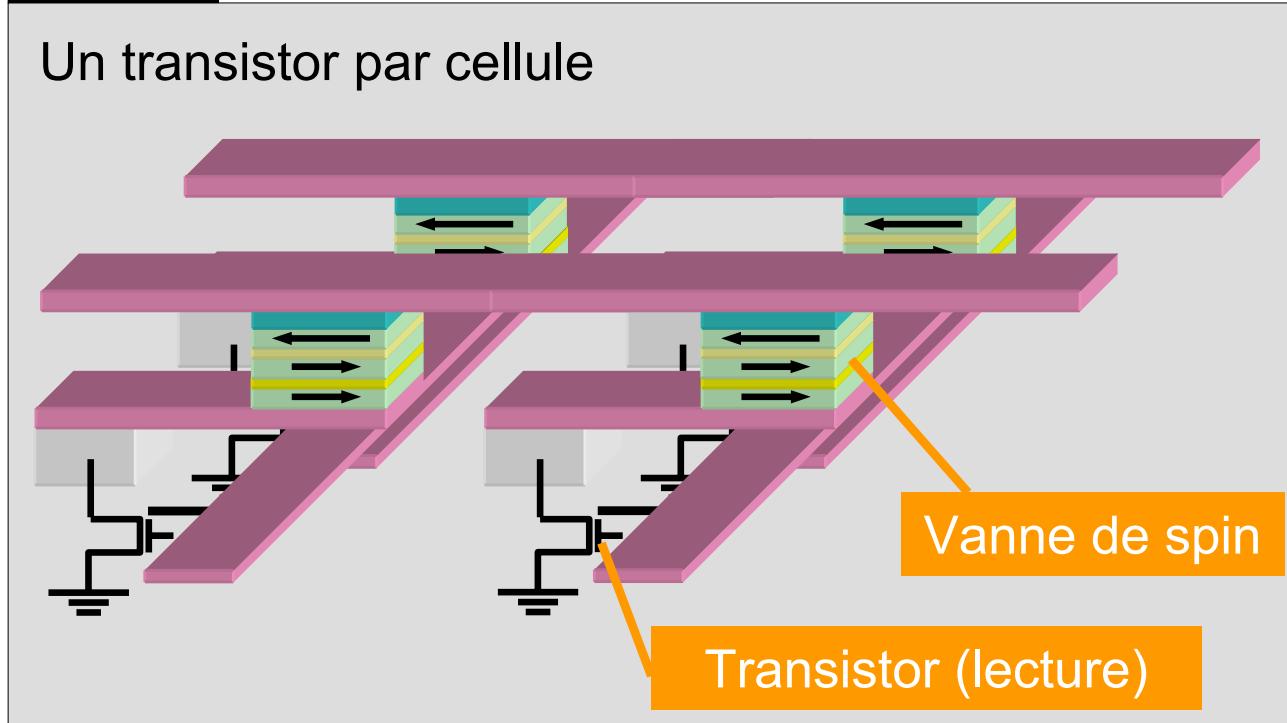
1 bit = 1 vanne de spin



Motivation: mémoire non volatile (mise en route; consommation)

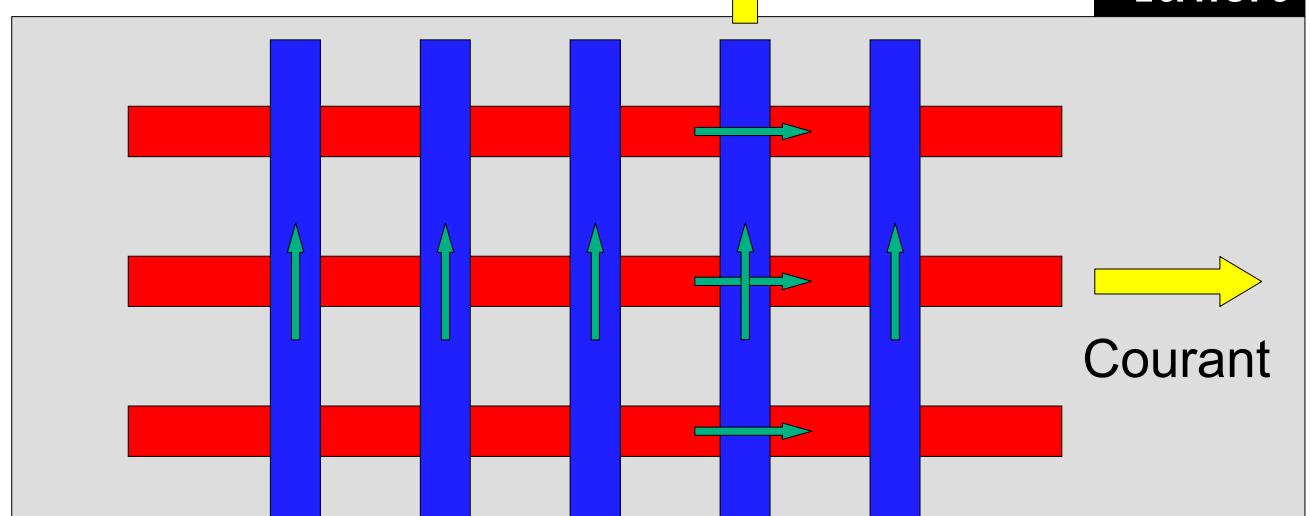
Lecture

Un transistor par cellule



Courant

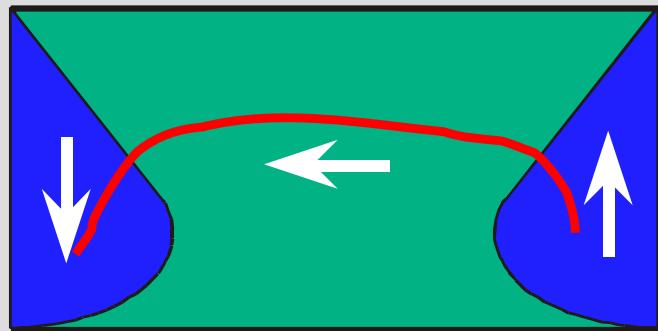
Écriture



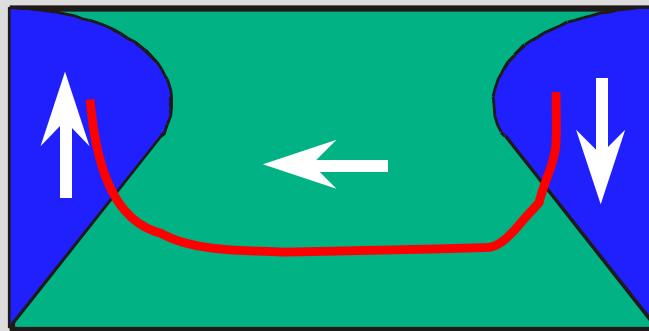
Sous-structures du monodomaine: domaines de bord

Au moins huit état quasi-dégénérés pour un bit !

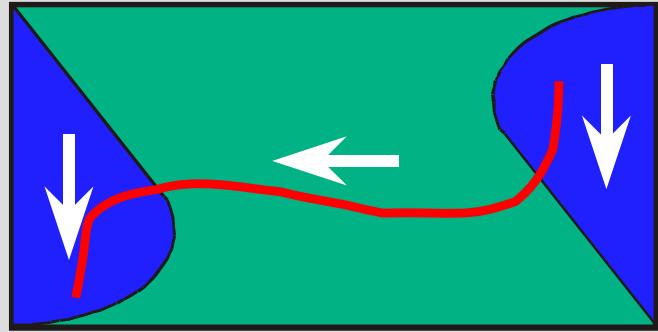
‘État C’



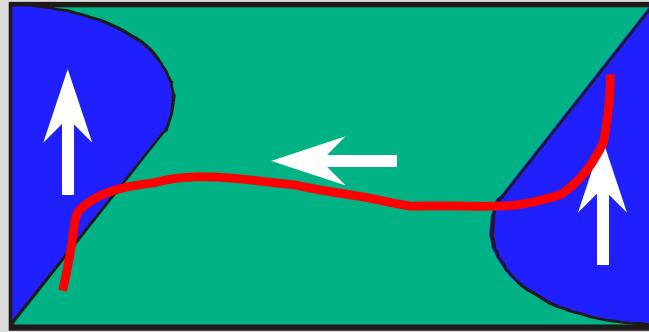
‘État C’



‘État S’

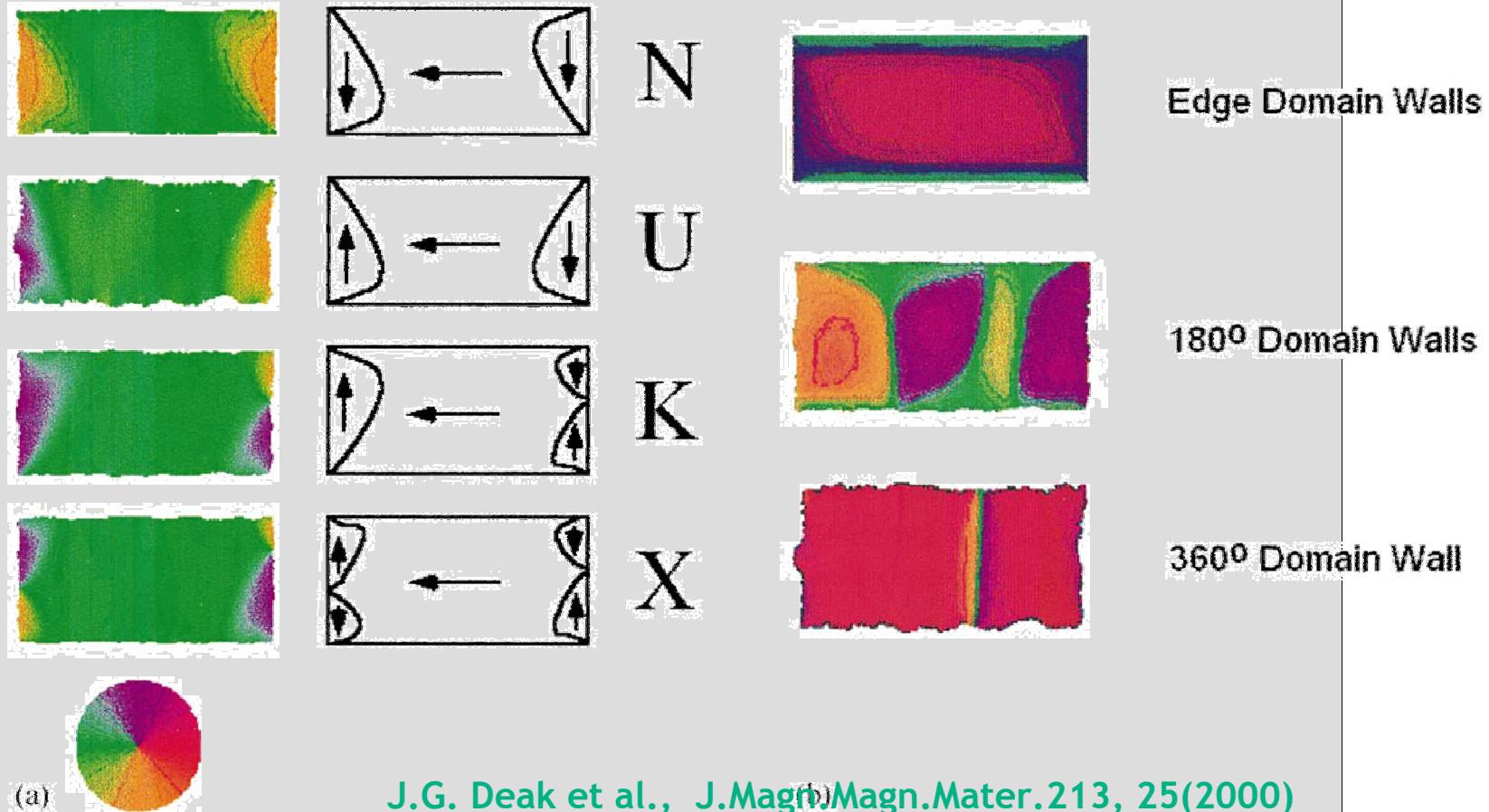


‘État S’



Influence de la rugosité de bord

Simulations micromagnétiques



- ↳ Source de bruit
- ↳ Rectangle n'est pas la meilleure forme
- ↳ Influence de la dynamique de renversement d'aimantation

Comparatif des mémoires solides

Mécanisme	DRAM	SRAM	Flash	MRAM	FeRAM	PC-RAM
Date	2002	2002	2002	2004	2004	2004
Taille initiale	130 nm	130 nm	150 nm	350 nm	130 nm	100nm
Structure/cellule	1T-1C	6T	1T	1T-1C	1T-1C	1T-1C
Surface/Cellule	8F ² 0.14 μ ²	10F ² 0.16 μ ²	10F ² 0.19 μ ²	10-20F ² ?	20 F ² 0.68 μ ²	6F ² 0.06 μ ²
Temps lecture -écriture	<20ns	<10ns	~80ns (R) 1ms (W)	<25ns	<10ns	<100ns
Cyclage	Illimité	Illimité	>10 ⁵	>10 ¹⁵	>10 ¹³	>10 ¹³
Persistence	Volatile	Volatile	>10 ans	>10 ans	>10 ans	> 10 ans

En course: Infineon-IBM (Altis semi-conducteurs), Motorola-Philips-STMicroelectronics, NEC, Cypress etc.

1. Quelques rappels sur le magnétisme

2. Enregistrement magnétique:

- * Historique
- * Nouveaux effets pour les têtes
- * Nouveaux effets pour le media
- * Perspectives

3. MRAMs: Mémoires magnétiques à accès aléatoire

4. Perspectives et conclusion

Renversement précessionnel de l'aimantation

Démonstration: 1999

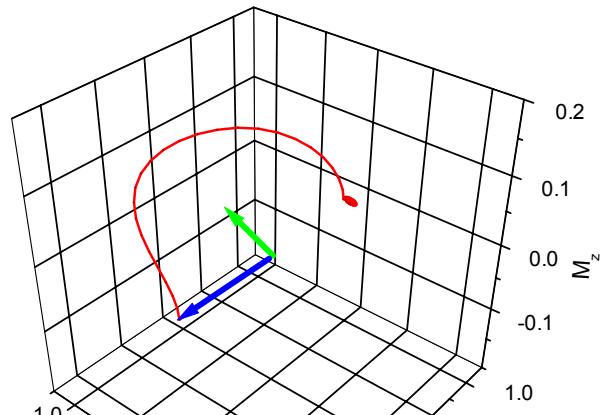
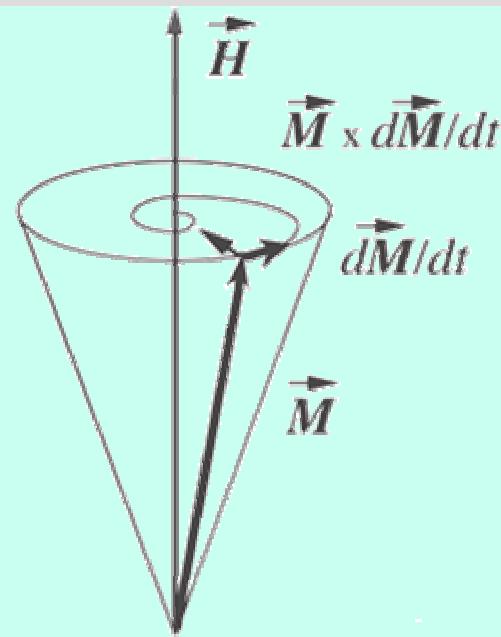
Evolution de l'aimantation:
équation de Landau-Lifshitz-Gilbert

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma_0 [\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}] + \frac{\alpha}{M_s} \left[\mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt} \right]$$

γ_0 : Facteur gyromagnétique

\mathbf{H}_{eff} : Champ magnétique effectif
(y compris champ appliqué)

α : Coefficient d'amortissement

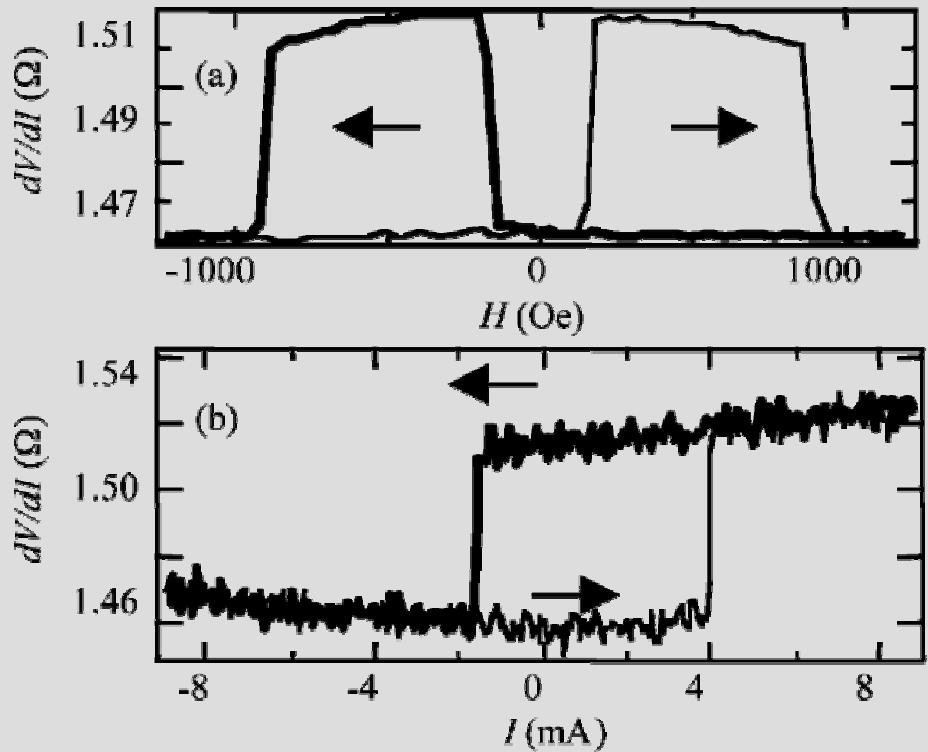


- ➡ Temps caractéristique: 0.1ns
- ➡ Prise en compte dans MRAMs
- ➡ Peu de pertes

Renversement par champ transverse:
trajectoire de spin

Renversement par courant polarisé

Effet inverse de la GMR



Cycle d'hystérésis conventionnel

Cycle d'hystérésis piloté par courant

Groupe Myers et Ralph, Université de Cornell

Perspectives

- ↳ Simplification des architectures (MRAMs etc.)
- ↳ Lecture/Ecriture entièrement électronique
- ↳ Dispositifs utilisant le déplacement de parois magnétiques



Plus généralement: électronique de spin

- Principe: combiner électronique (charge) et magnétisme (spin)
- Logique et mémoires universelles
- Transistors et circuits reprogrammables
- Problématique de matériaux: combinaison métaux/semi-conducteurs, ou bien semi-conducteurs magnétiques?



	Année de (re)découverte	Disques durs		MRAMs	Autres	Perspectives
		Têtes	Media			
AMR (Magnétorésistance anisotrope)		1990			Capteurs	
GMR (magnétorésistance géante)	1988	1998		X	Capteurs, R&D puces ADN	
TMR (magnétorésistance tunnel)	1975 / 1995			X	Capteurs, R&D puces ADN	Têtes DD?
Couplage RKKY	Années 80		2001 (SAF)			
Couplage d'échange F/AF	1956 / 1994	X	?	X		
Renversement précessionnel	1999			R&D		MRAMs
Renversement par courant polarisé	~2000			R&D		MRAMs
Injection de spin dans semi-conducteur	Années 90-2000					Processeurs, mémoires etc.

1990-2005, arrivée du ‘nano’, un nouvel age d’or pour le magnétisme

↳ Conjonction favorable de multiples facteurs:

- ↳ Progrès des techniques de fabrication, caractérisations structurale et magnétique.
- ↳ Progrès de puissance de calcul: simulations et expériences se recoupent dans la gamme 50nm – 1micron.
- ↳ Pression technologique (délais de mise en œuvre raccourcis)

↳ Avancées accomplies:

- ↳ Nombreux effets fondamentaux nouveaux ou revisités: GMR, TMR, RKKY, couplage F/AF, renversement précessionnel, renversement et déplacement de paroi par courant polarisé, injection de spin.
Interfaces, dimensions nanométriques et effets quantiques essentiels
- ↳ Applications: disques durs, MRAMs, électronique de spin.

↳ Commentaires et perspectives:

- ↳ Futur de l’enregistrement magnétique? Établissement de l’électronique de spin?
- ↳ Futur du nanomagnétisme: recherche fondamentale ou nanotechnologie?
- ↳ Nanomagnétisme repose sur compréhension fine des matériaux. Défi sur les caractérisations et le contrôle des interfaces



Remerciements

- Dominique GIVORD, Laurent RANNO
Laboratoire Louis Néel, Grenoble
- Gilles GAUDIN, Jérôme MORITZ
Spintec, CNRS/CEA-Grenoble

- Matthieu JAMET
CEA-Grenoble
- Jacques MILTAT
Laboratoire de physique des solides, Orsay
- Agnès BARTHÉLÉMY
CNRS-Thalès, Orsay

Quelques références

- A. Hubert, R. Schäfer
Magnetic Domains – The analysis of magnetic microstructures, Springer (1998,2000).
- M. Johnson, Ed.,
Magnetoelectronics, Elsevier Academic Press (2005).
- I. Zutic et Coll.,
Spintronics: Fundamentals and applications, Rev. Mod. Phys. 76, 323-410 (2004)
- Hirota, E., H. Sakakima, and K. Inomata,
Giant Magneto-Resistance Devices, Springer (2002).
- A. Fert, J.-P. Nozières, Ed.,
Électronique de spin, C. R. Physique, automne 2005.
- J. Bansmann et coll.,
Magnetic and structural properties of isolated and assembled clusters, Surf. Sci. Rep. 56, 189 (2005)

