

L'enregistrement sur des nanostructures magnétiques

Des nanostructures pour l'enregistrement magnétique.



O.Fruchart

Laboratoire Louis Néel (CNRS-UJF-INPG)
Grenoble



- ➔ **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:

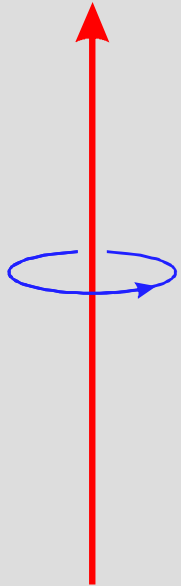
- * Historique**
- * Nouveaux effets pour les têtes**
- * Nouveaux effets pour le media**
- * Perspectives**

3. MRAMs: Mémoires magnétiques à accès aléatoire

4. Perspectives et conclusion

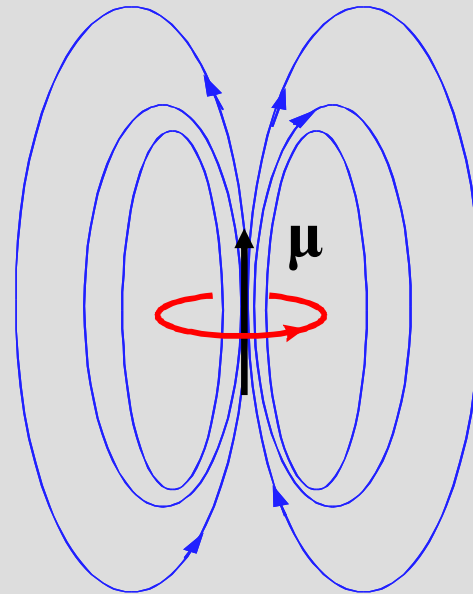


Champ d'Oersted



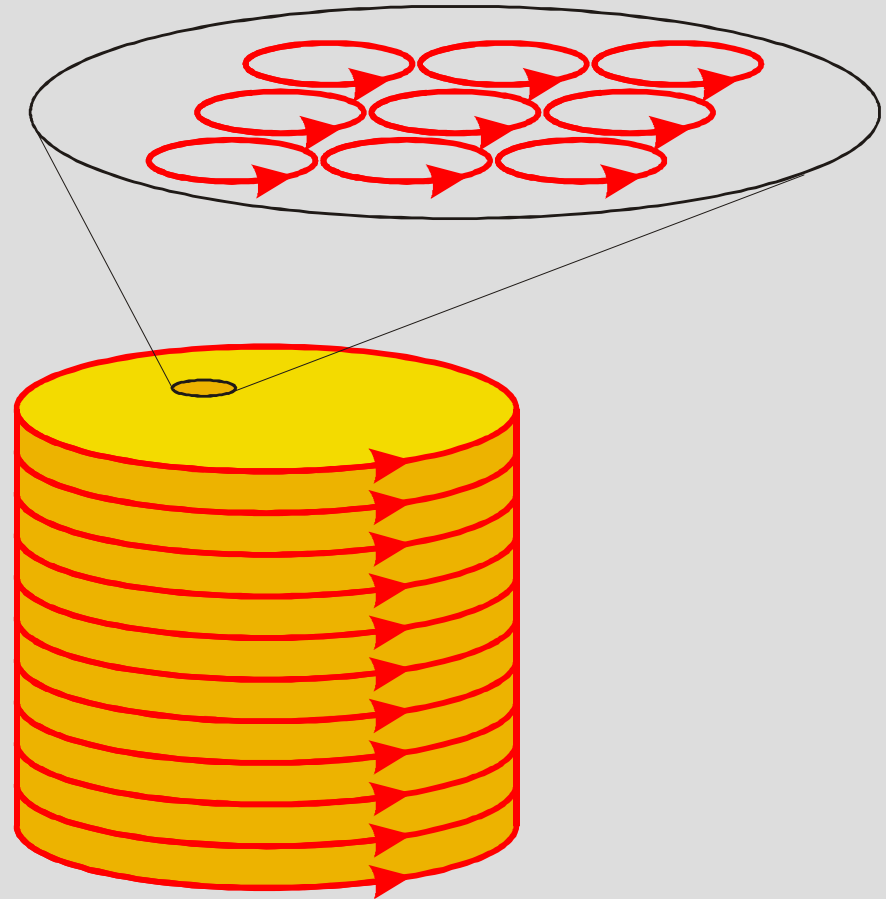
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

Moment magnétique



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

Matériau magnétique



Aimantation: A.m^{-1}

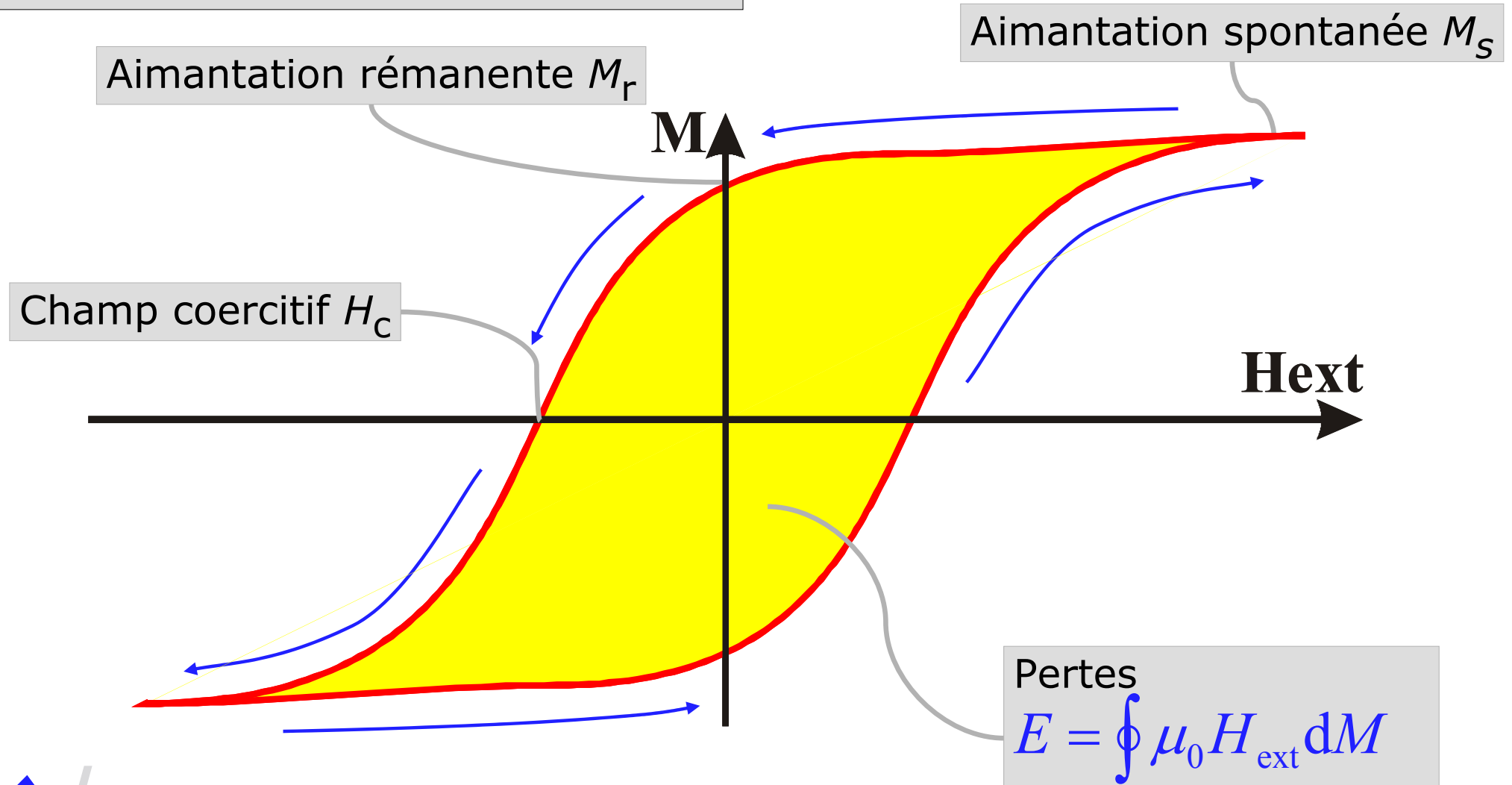
Moment magnétique: A.m^2



Manipulation des matériaux magnétiques:

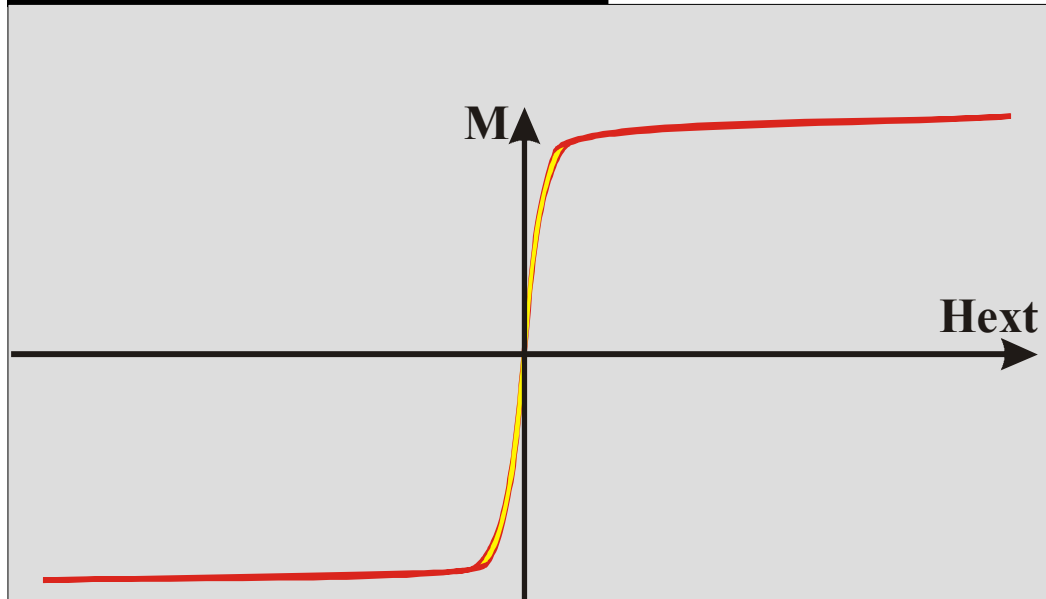
↳ Application d'un champ magnétique

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





Matériaux doux

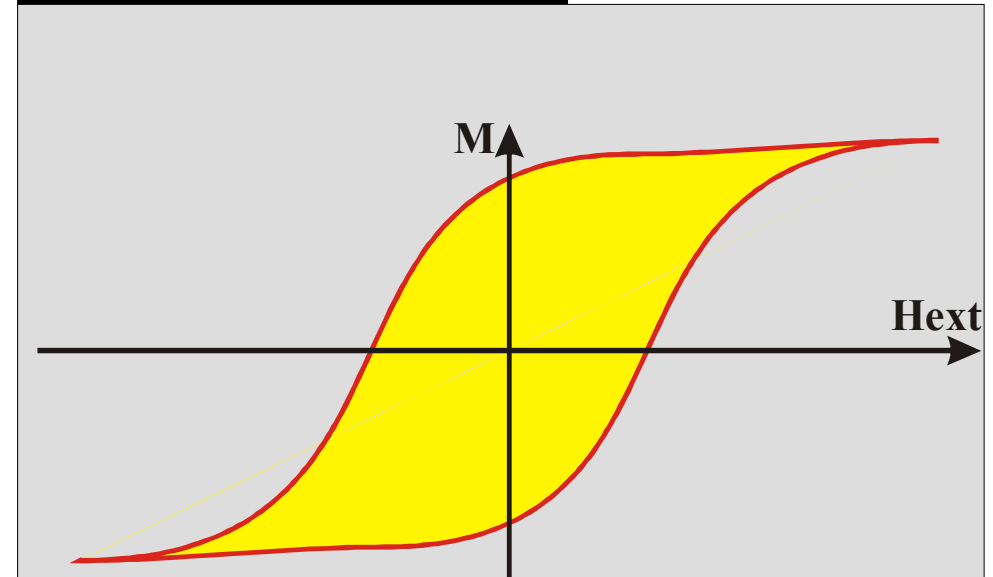


Transformateurs

Guides de flux

Blindage magnétique

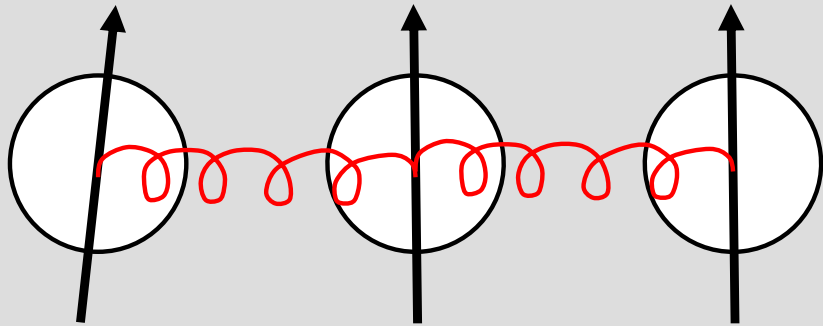
Matériaux durs



Aimants permanents, moteurs

Enregistrement magnétique

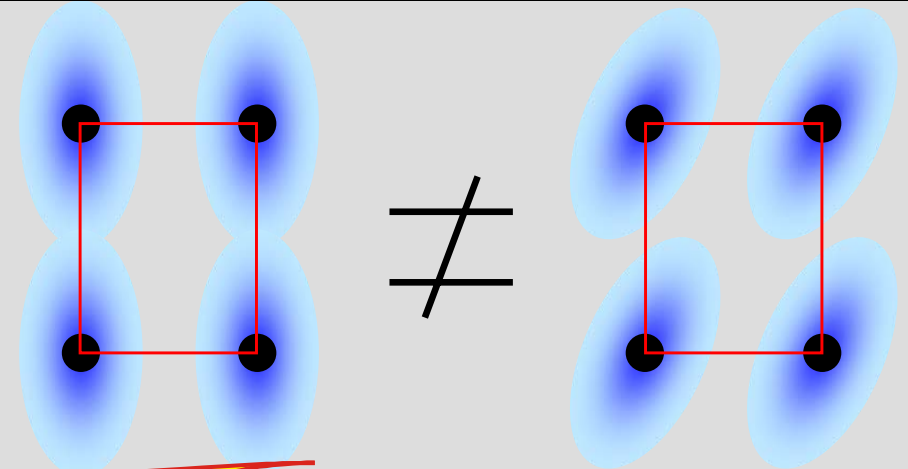
Énergie d'échange



$$E_{\text{Ech}} = -J_{1,2} \vec{S}_1 \cdot \vec{S}_2$$

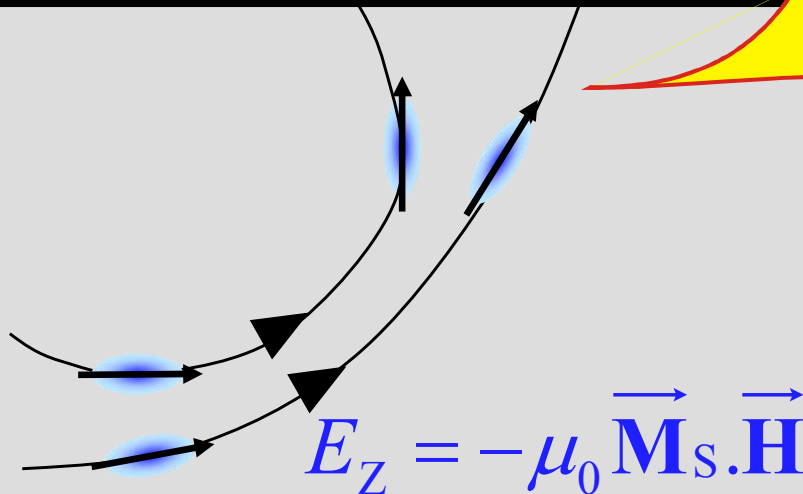
$$= A(\nabla \theta)^2$$

Énergie d'anisotropie magnétocristalline



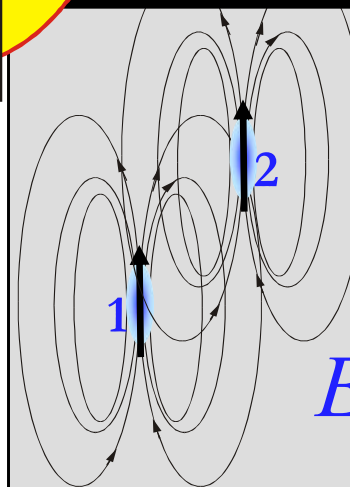
$$E_{\text{mc}} = K \sin^2(\theta)$$

Énergie Zeeman



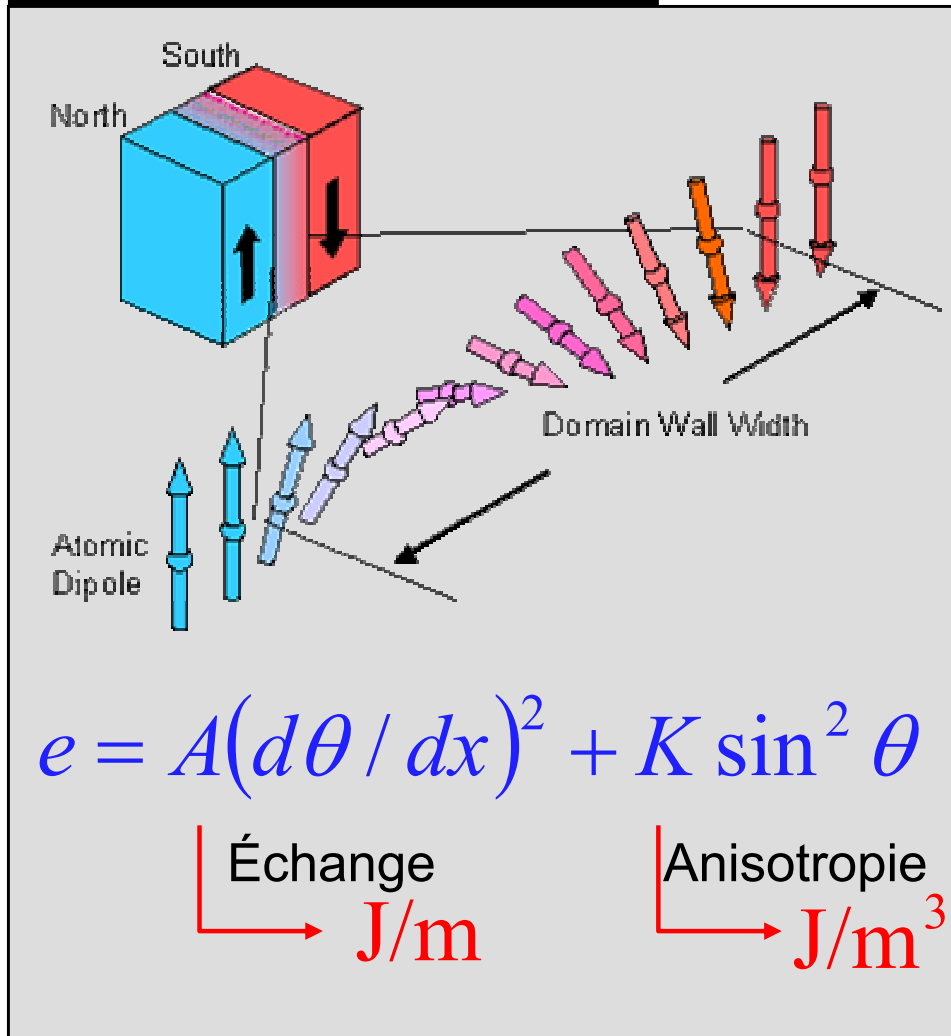
$$E_Z = -\mu_0 \vec{M}_s \cdot \vec{H}$$

Énergie dipolaire



$$E_d = -\frac{1}{2} \mu_0 \vec{M}_s \cdot \vec{H}_d$$

Une longueur caractéristique:
largeur de paroi de Bloch λ_B



Valeurs numériques

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

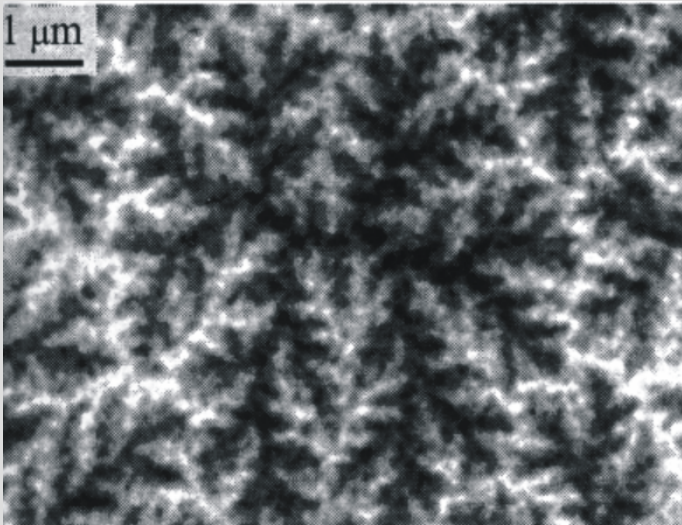
$$\lambda_B = 1\text{nm} \xrightarrow{\text{Dur}} \lambda_B = 100\text{nm} \xrightarrow{\text{Doux}}$$



Définition: magnétisme mésoscopique

Matériau massif

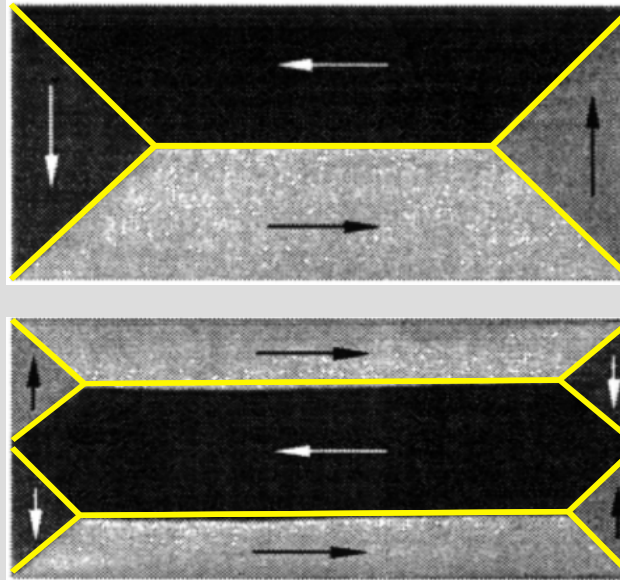
Domaines nombreux
et complexes



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

Échelle mésoscopique

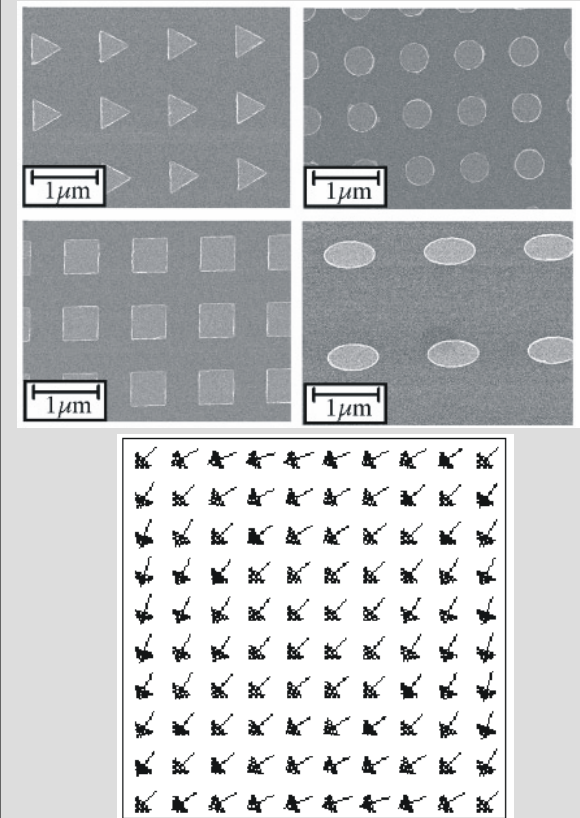
Petit nombre de domaines,
de forme simple



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 monodomaines magnétiques



1. Quelques rappels sur le magnétisme

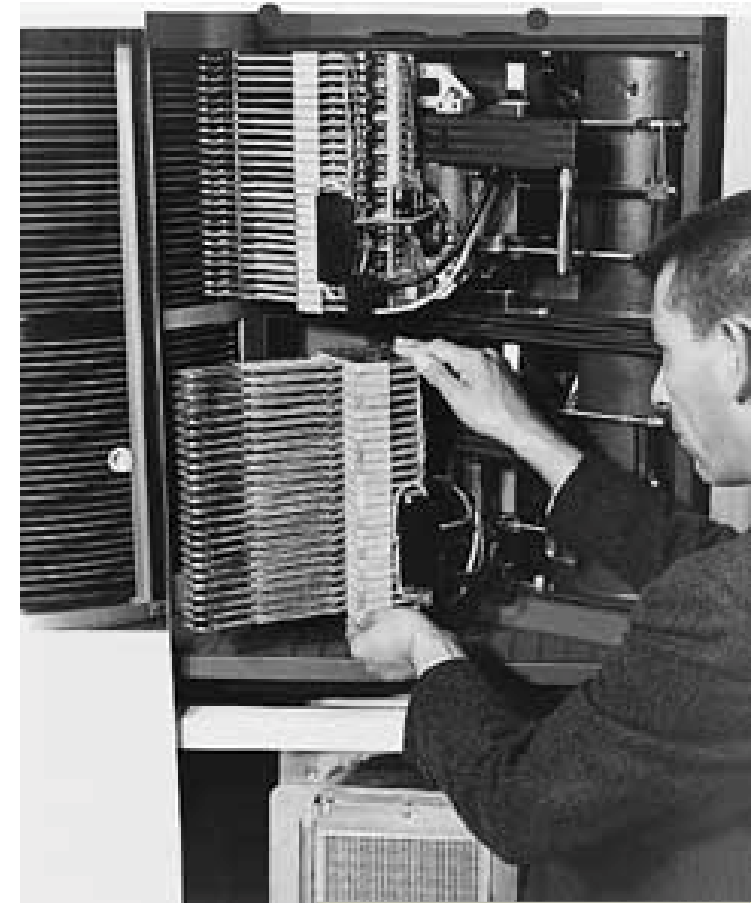
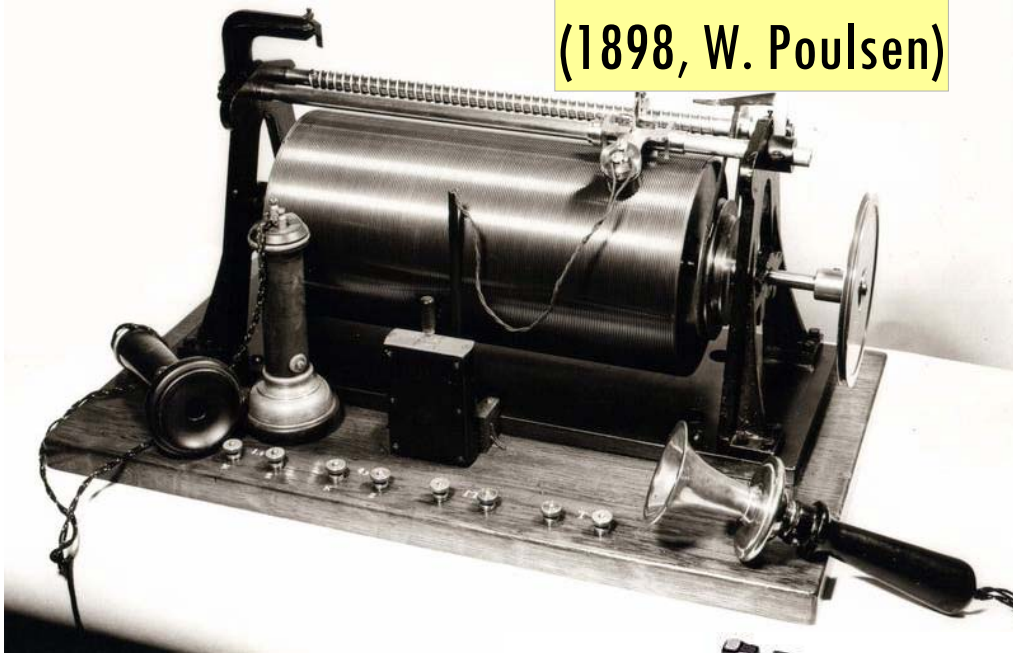
2. Enregistrement magnétique:

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

3. MRAMs: Mémoires magnétiques à accès aléatoire

4. Perspectives et conclusion

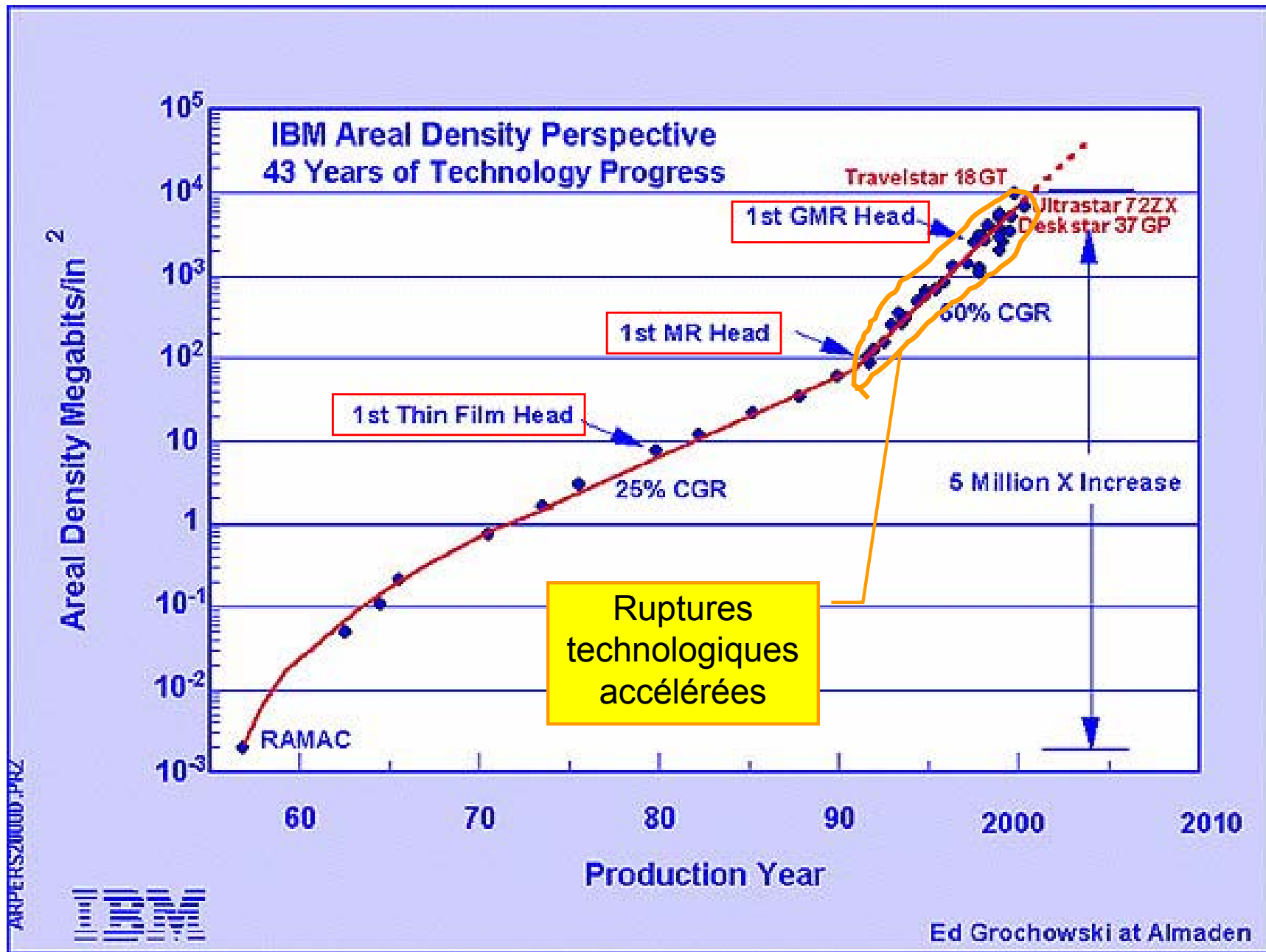
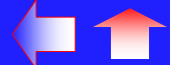
Télégraphone
(1898, W. Poulsen)



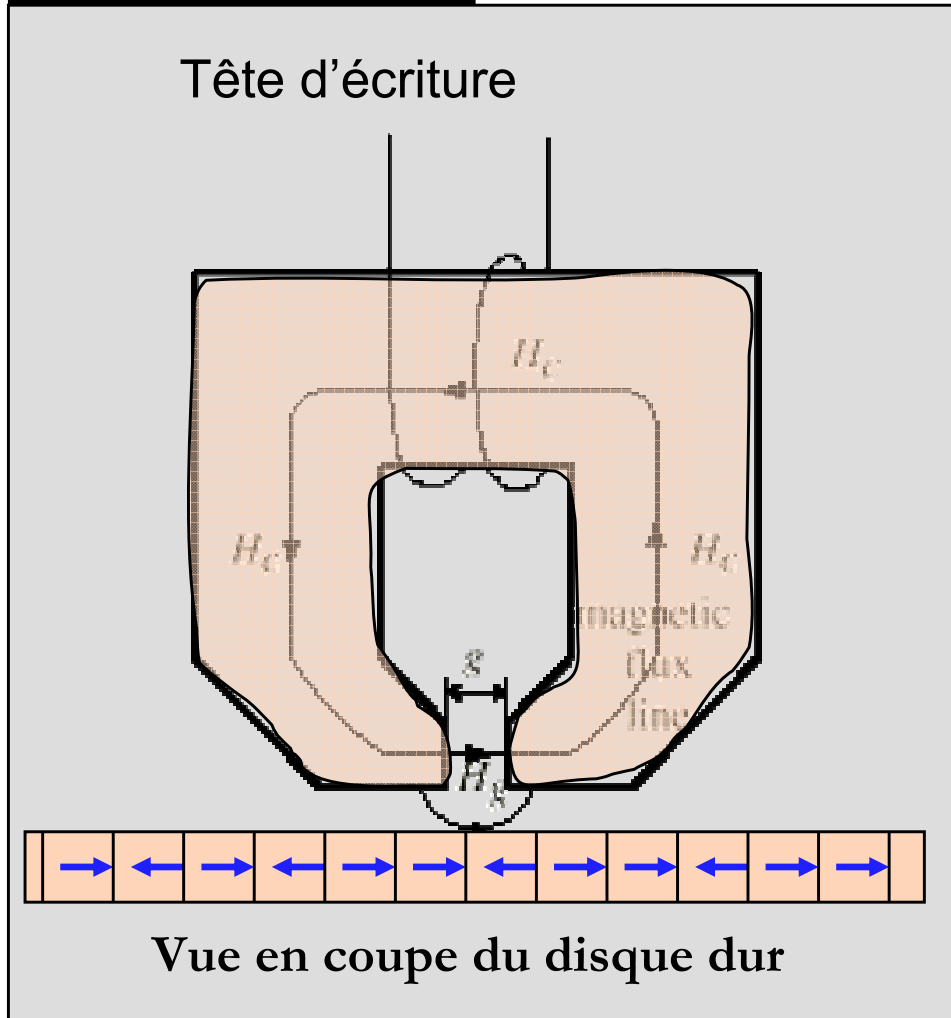
RAMAC (IBM, 1956)
2 kbit/in²
50 disques Ø 60 cm
Total 5Mo



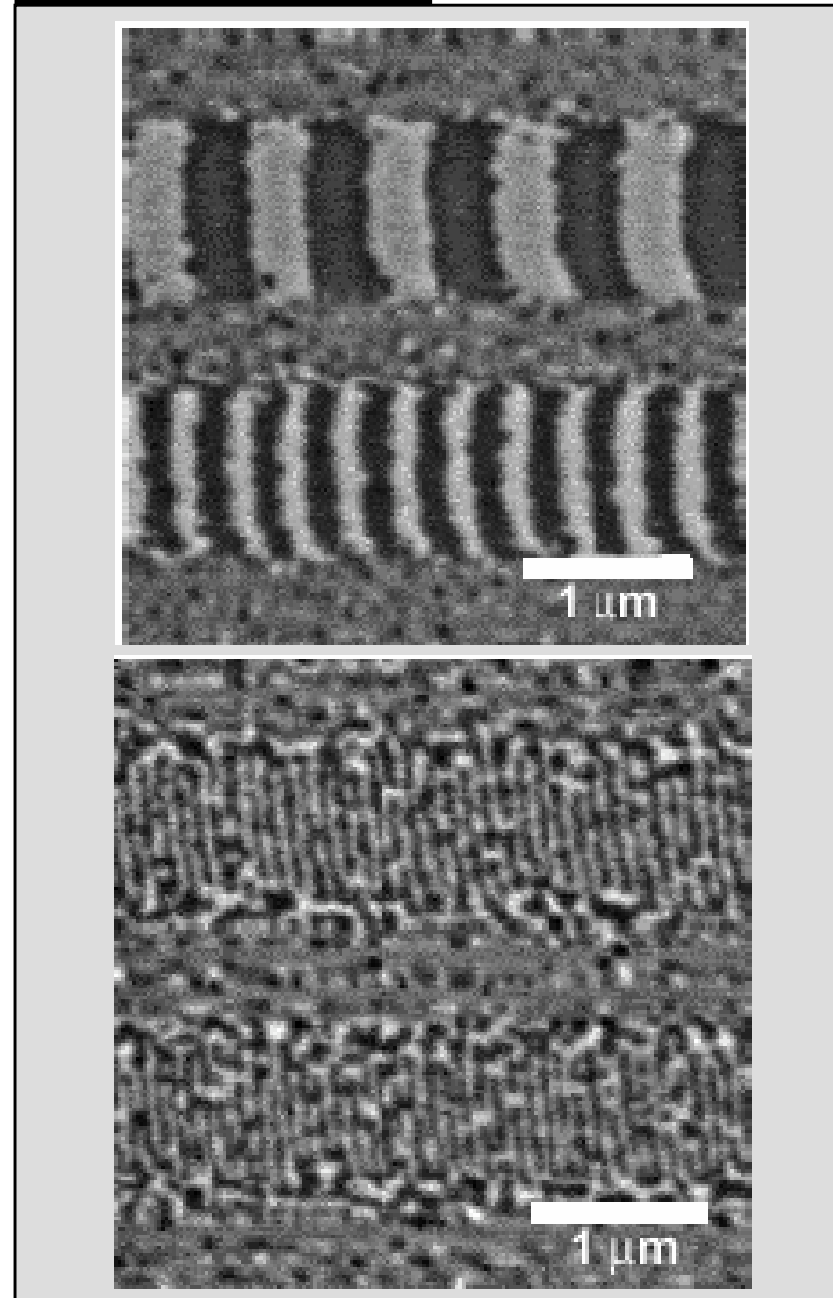
Disque dur actuel
(>200Go)



Principe du stockage



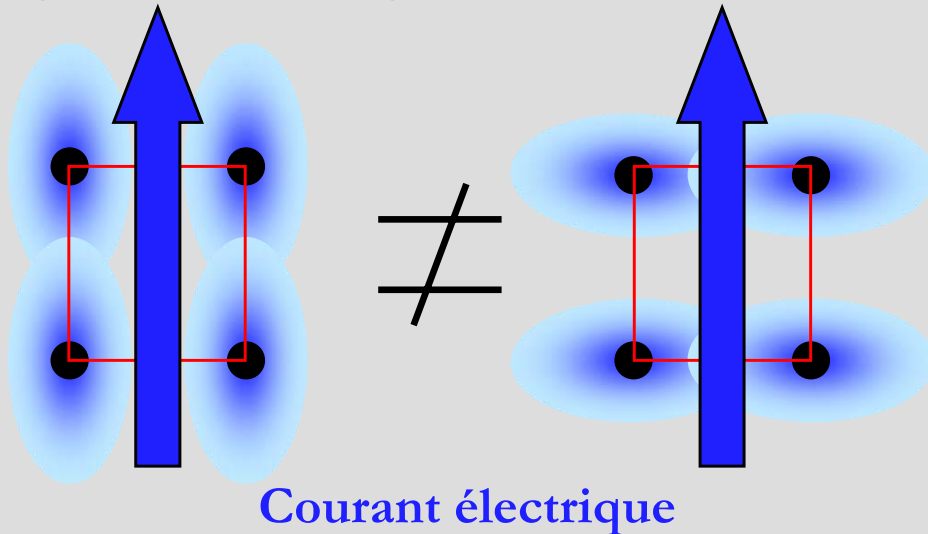
Vue du disque dur





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

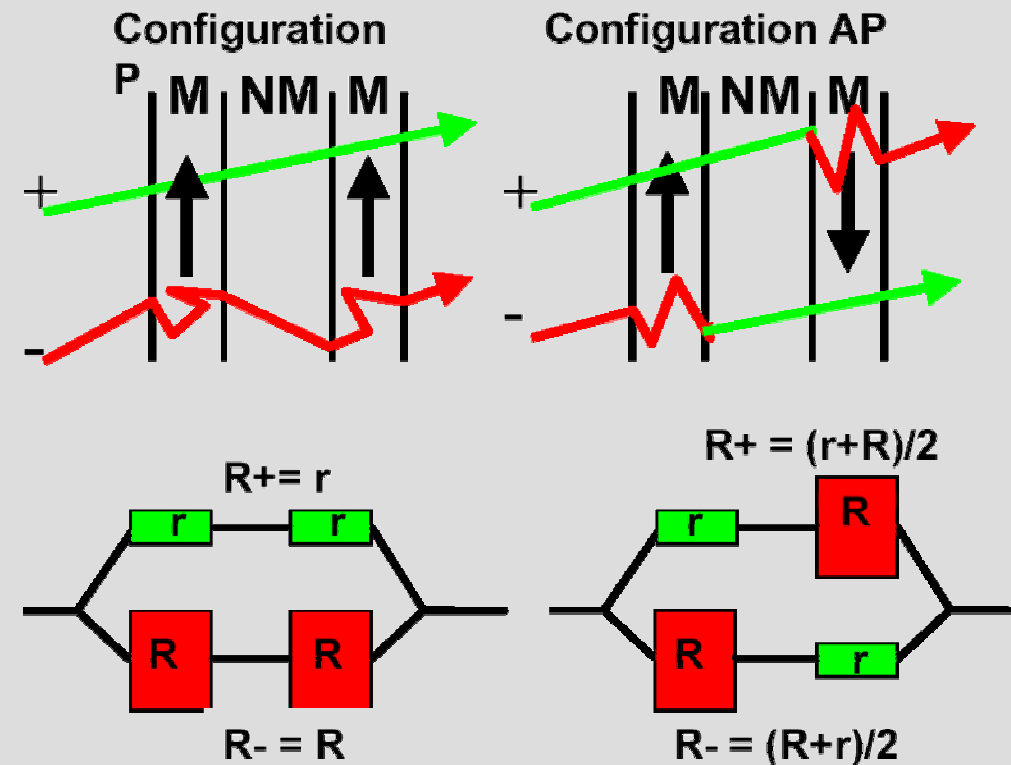
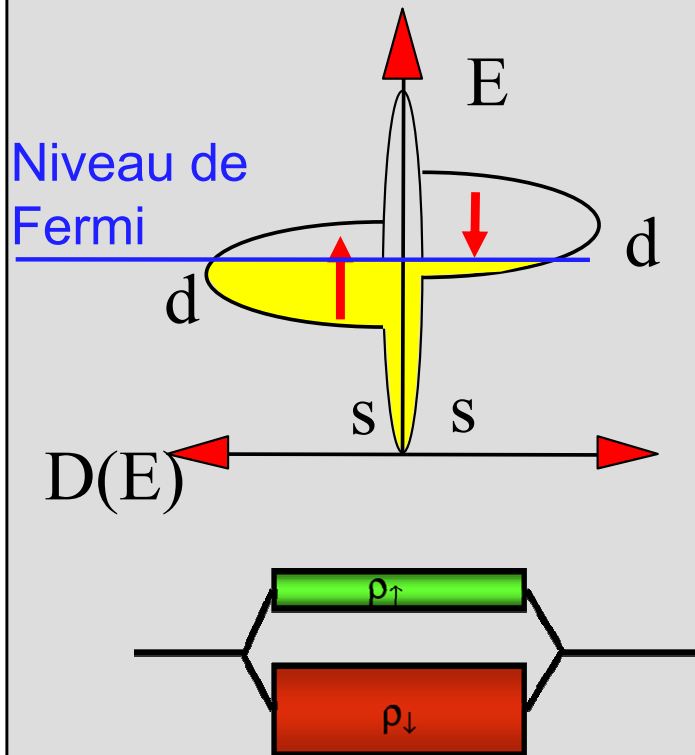
Capteur de champ magnétique

- 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 \Rightarrow Effet quantique

Spécificités

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

Géométrie: multicouche

Amplitude: $\leq 40-50\%$

Utilisations

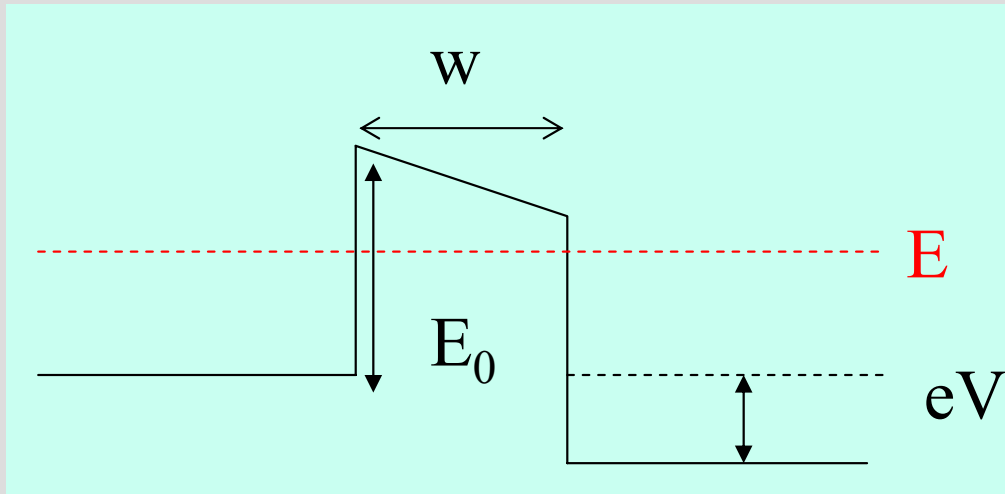
- Capteurs magnétiques: tête de lecture de disque dur (1998) etc.
- Mémoire magnétique



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

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

Ferro2

Isolant

Ferro1

Spécificités

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

Géométrie: multicouche

Amplitude: $\leq 100-150\%$

Forte résistance

Couche ultramince d'oxyde

Utilisations possibles

- Capteurs magnétiques
- Mémoire magnétique

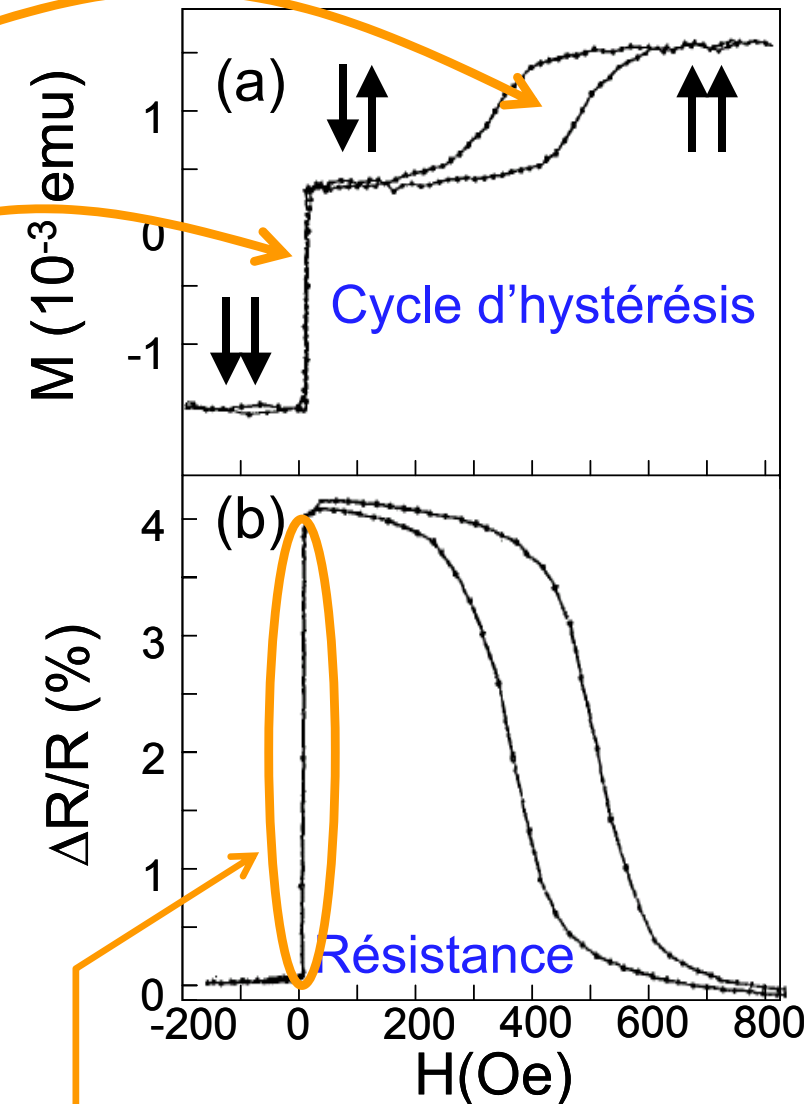


Principe de la vanne de spin

Couche libre et couche piégée

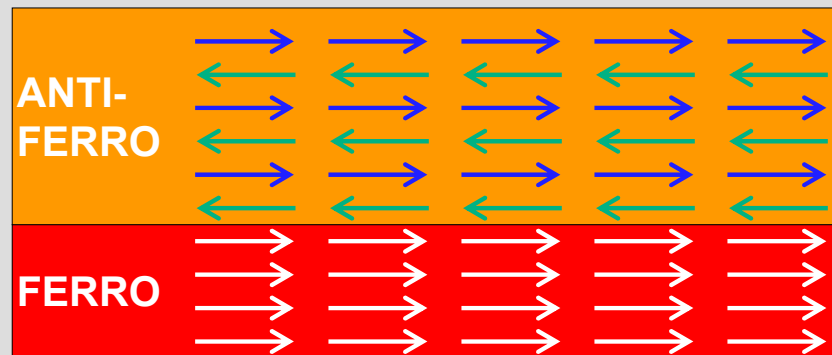


B.Dieny, V.S.Speriosu, et coll.
IBM Almaden



Principe du piégeage

Couplage d'échange
ferromagnétique/antiferromagnétique

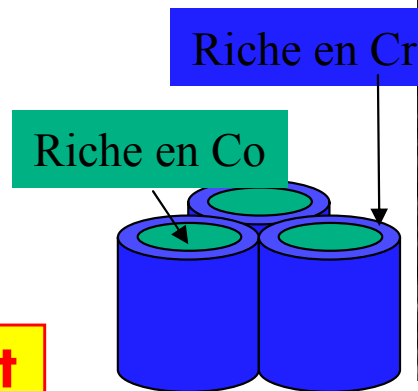
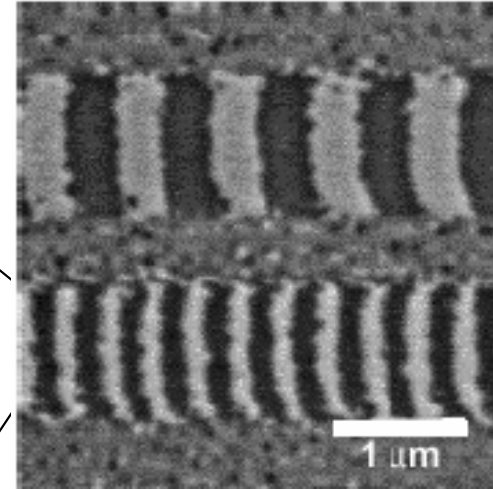
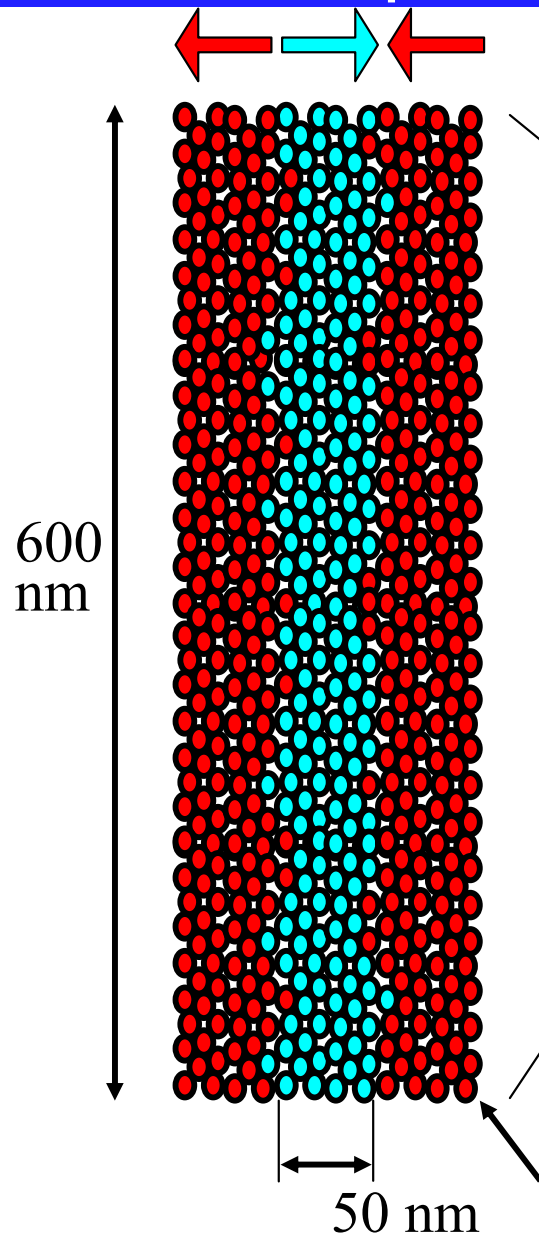


- ↗ Augmentation de coercitivité
- ↗ Décalage des cycles d'hystérésis

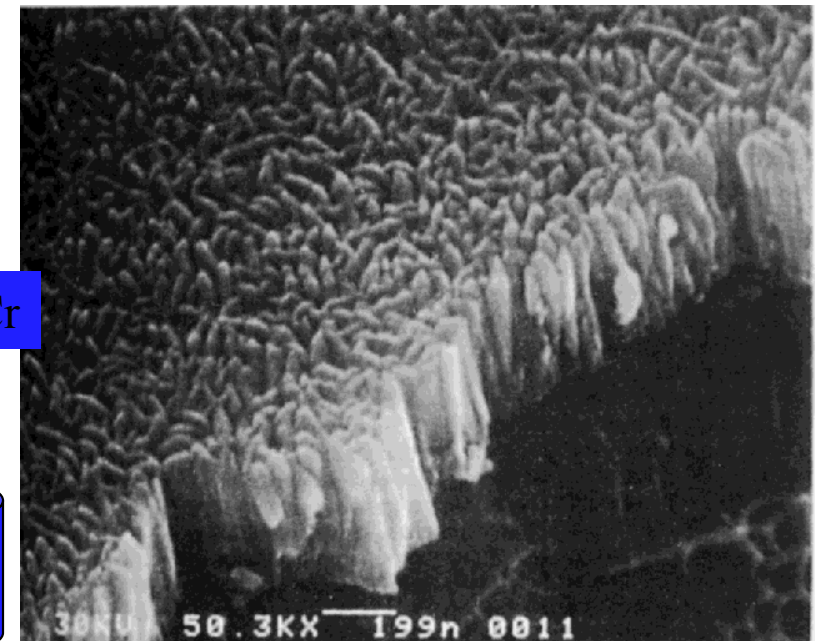
Zone de travail



Principe du media granulaire



Grain : 10 nm

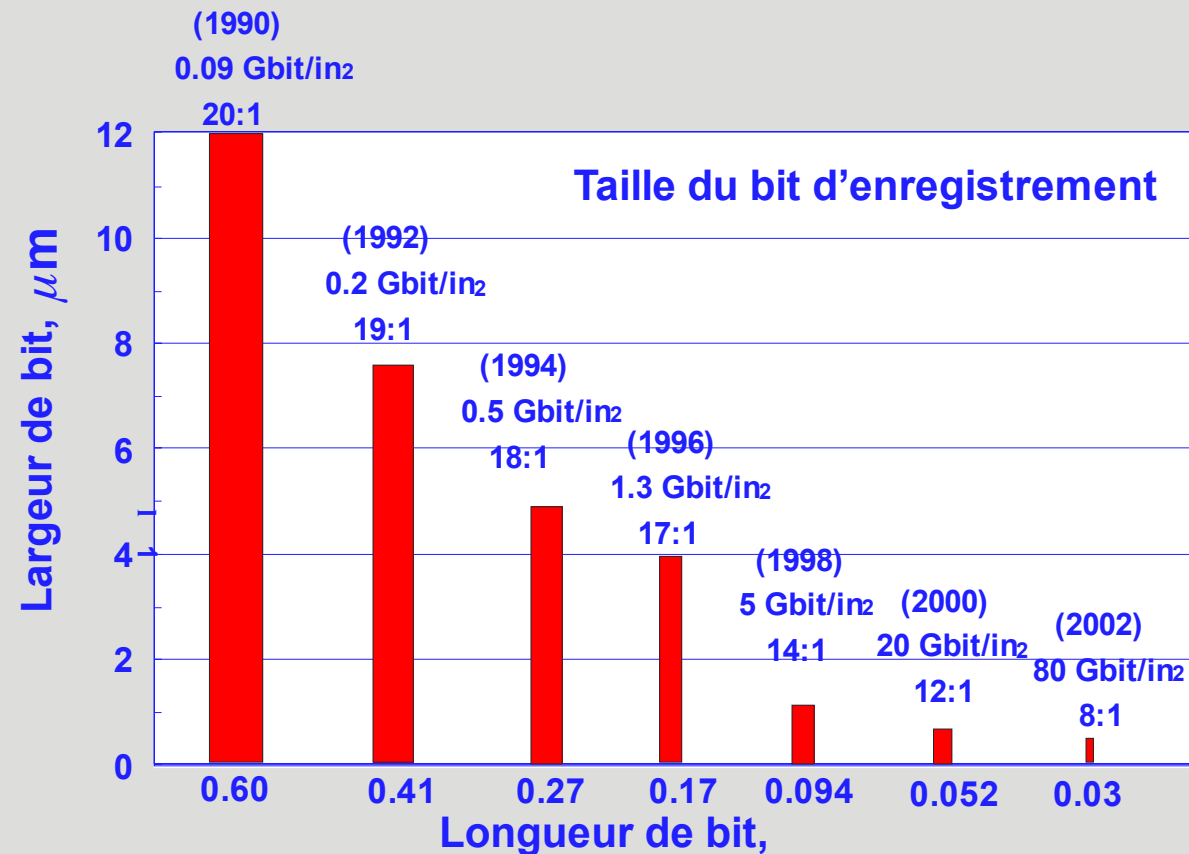


Disque CoPtCrTaB

Grand nombre de grains par bit



Taille du bit d'enregistrement

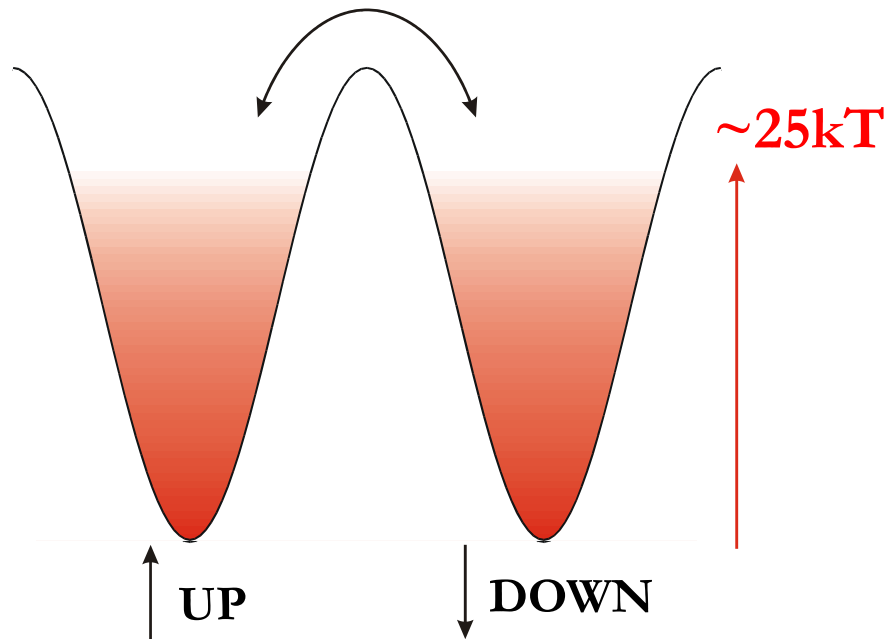


Ed Grochowski at Almaden

**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

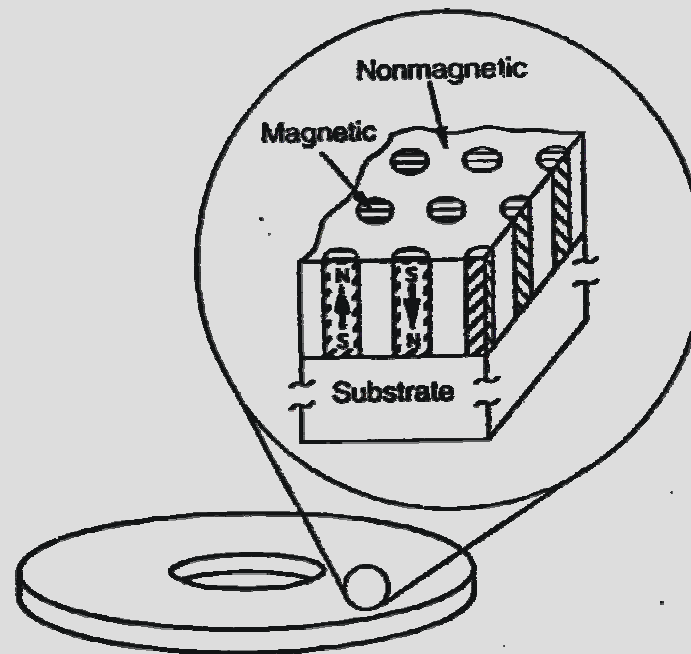
1994 (S. Chou et coll.)

Avantage: 1 grain par bit

↪ deux ordres de grandeur de densité gagnés



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



Propriétés requises

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

↪ **Stimulation de la
recherche fondamentale**

Dépôts sur surfaces Si prégravées

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

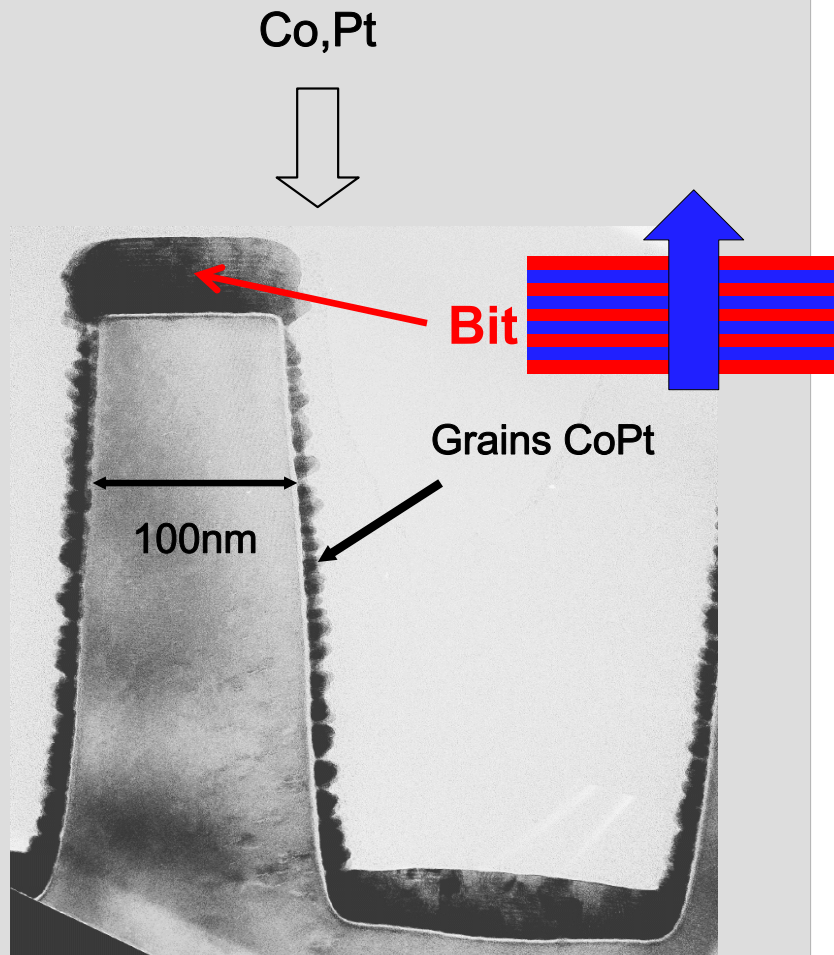
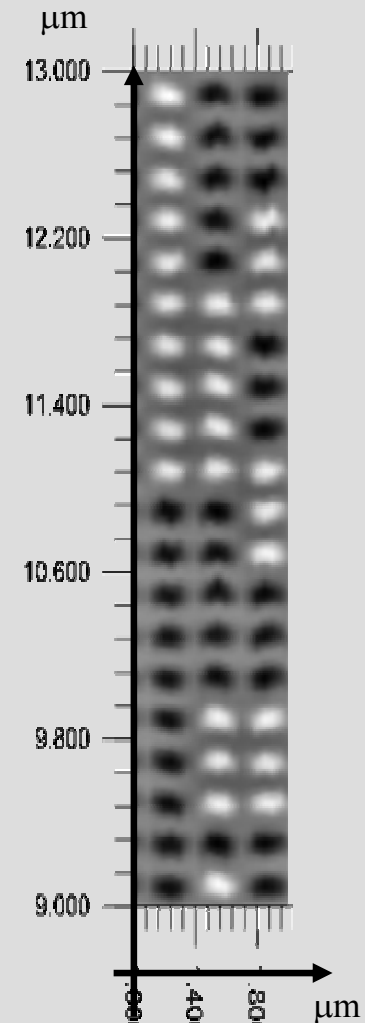
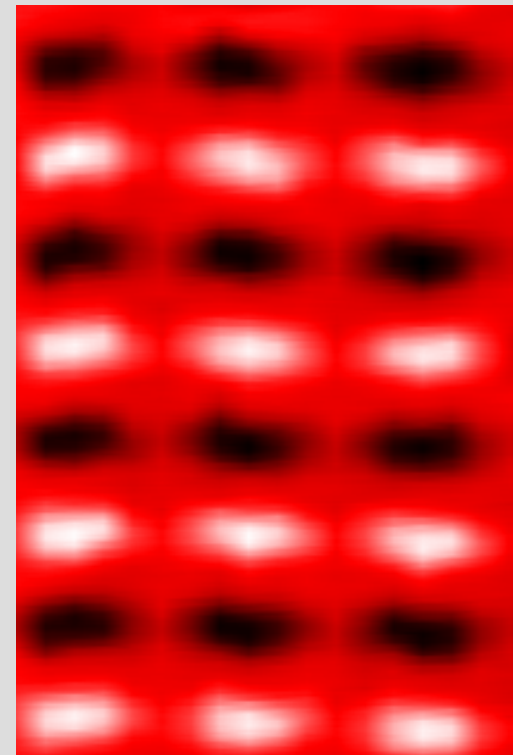


Image TEM d'un réseau de Si couvert d'une multicouche Co/Pt.
Largeur 100nm ; hauteur 300 nm

Tests écriture-lecture

Utilisation d'une tête lecture-écriture commerciale



Remarque : aimantation perpendiculaire

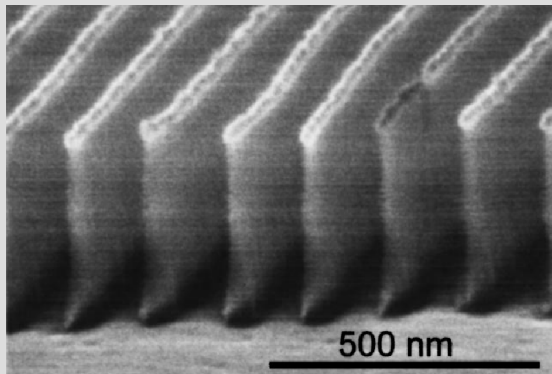
↳ Faible distribution de propriétés magnétiques / Coût modéré (nanomoulage)

Discrétisation par irradiation

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

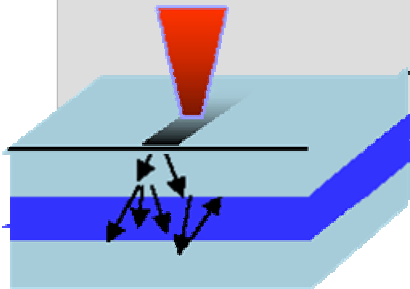
Principe: modification locale de l'anisotropie, voire même paramagnétisme.

↪ Bits découplés (Pt/Co/Pt)

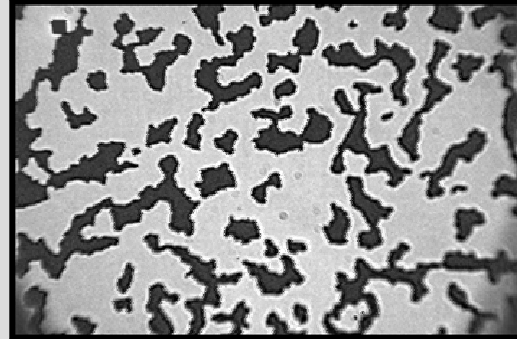


Masque d'irradiation

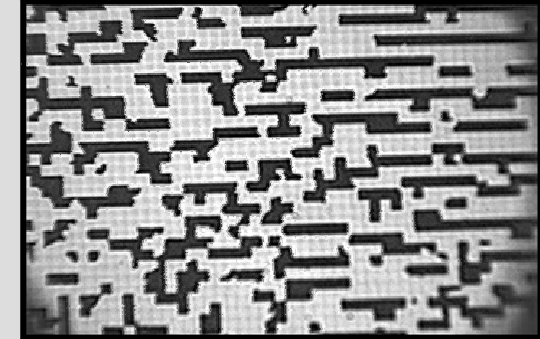
25 keV Ga⁺ ion



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

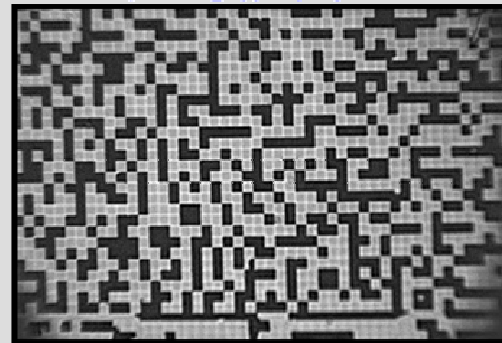


$4 \cdot 10^{14} \text{ Ga}^+ / \text{cm}^2$

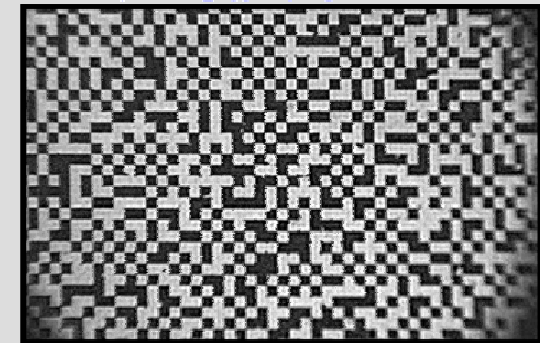


↪ Virgin film behavior: large $\uparrow \downarrow$ domains

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



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



↪ Pattern of dots in dipolar interaction

- ↪ Faible distribution de propriétés magnétiques
- ↪ Surface plane
- ↪ Coût modéré (lithographie par réplique)



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?

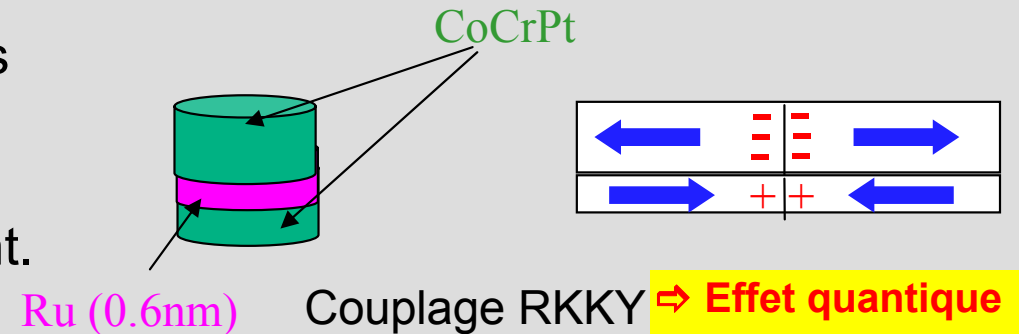
- ↪ Nouveaux types de media granulaires
- ↪ Arrêt prévisible des progrès, vers 1-10 Tbit/in² (~5ans)



Grains antiferromagnétiques synthétiques

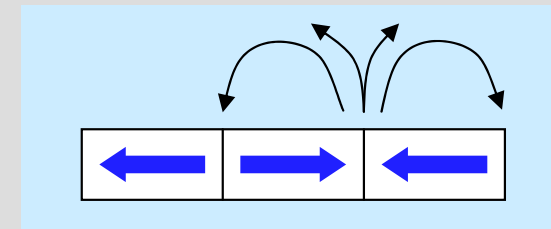
Fullerton et al. APL 2001 / Disques durs en 2001

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

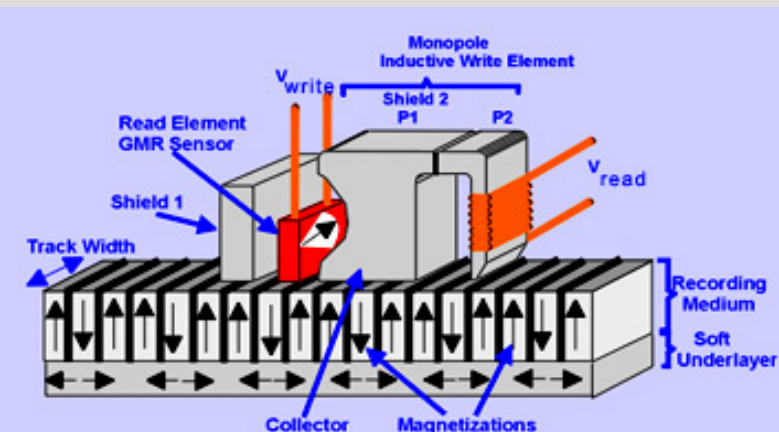


Grains à aimantation perpendiculaire

- 😊 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.



Planaire



Perp.

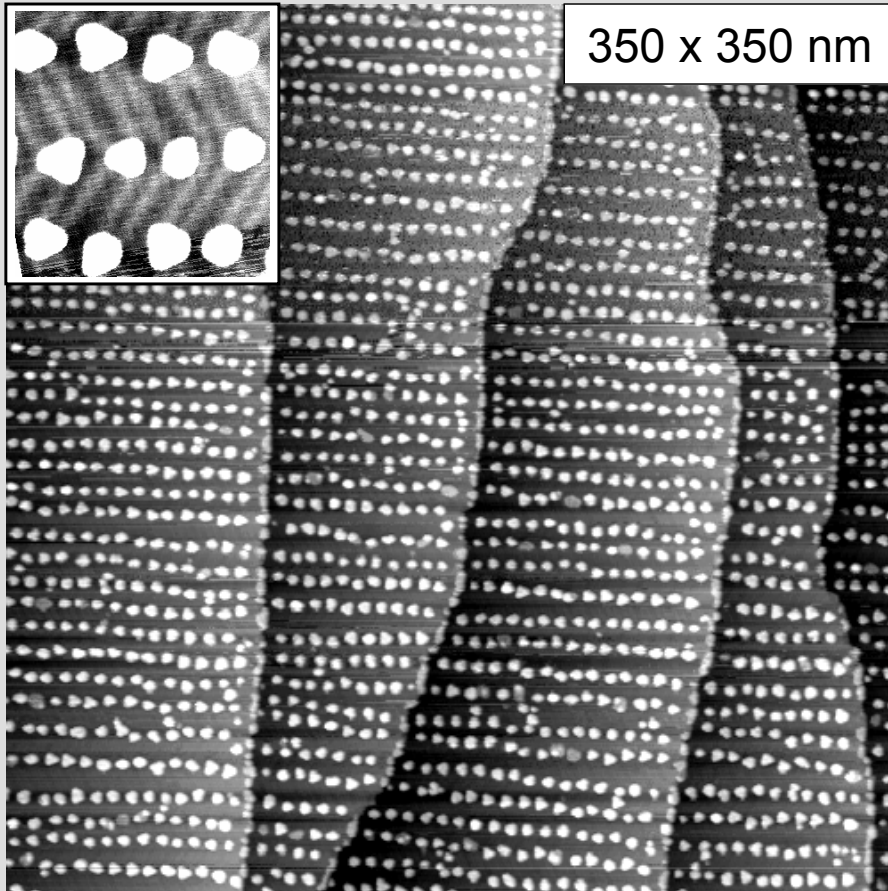
Il n'y a pas de petites économies !





Ordre et monodispersion

Plots de Co/Au(111)

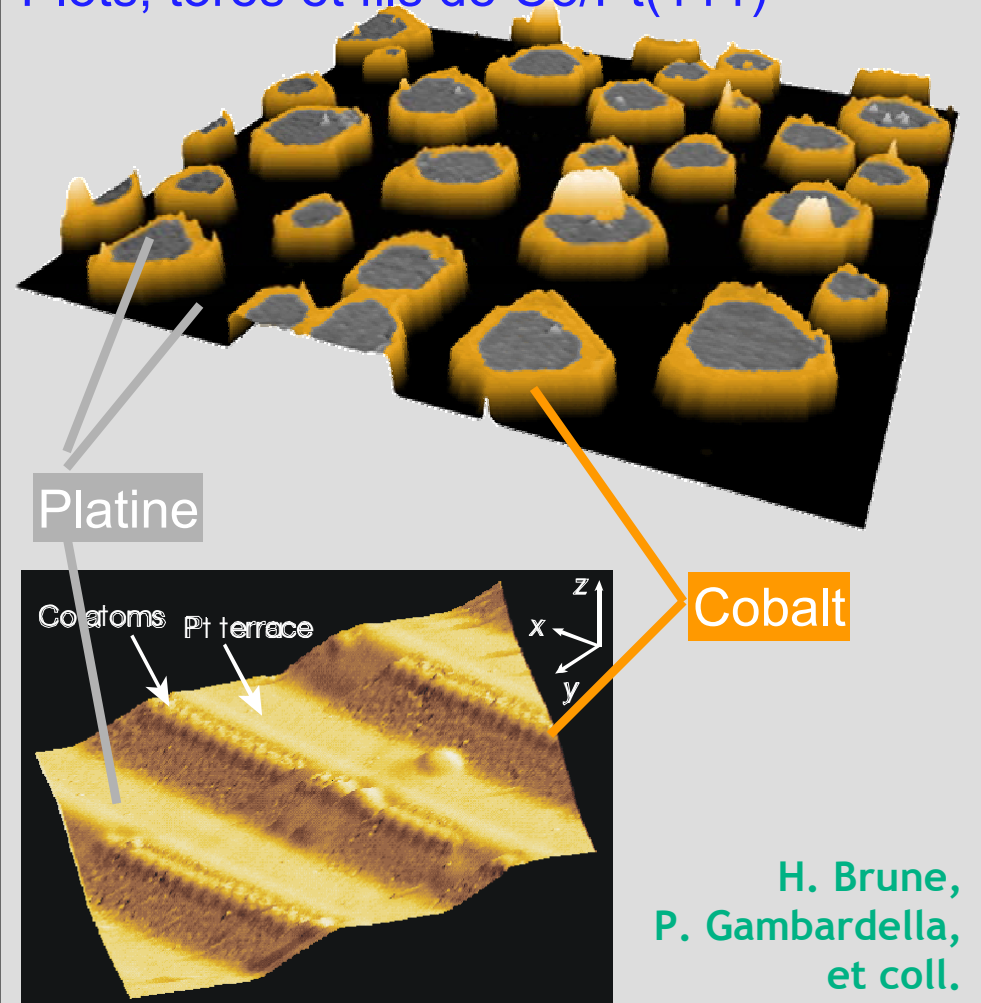


350 x 350 nm

O. Fruchart et coll.

Ingénierie de l'anisotropie magnétique

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



Platine

Cobalt

H. Brune,
P. Gambardella,
et coll.

😊 Nouvelle physique (croissance / magnétisme)

😞 Peu réaliste pour l'enregistrement (coût)

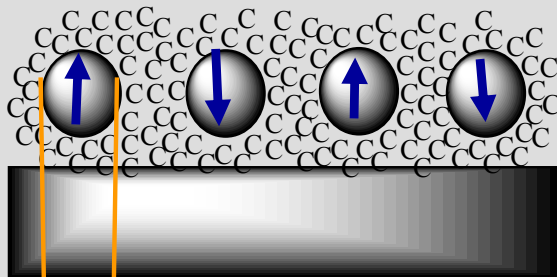
Nanoparticules par voie chimique, étalées sur disque

Nanoparticules d'alliage FePt
dans une matrice organique

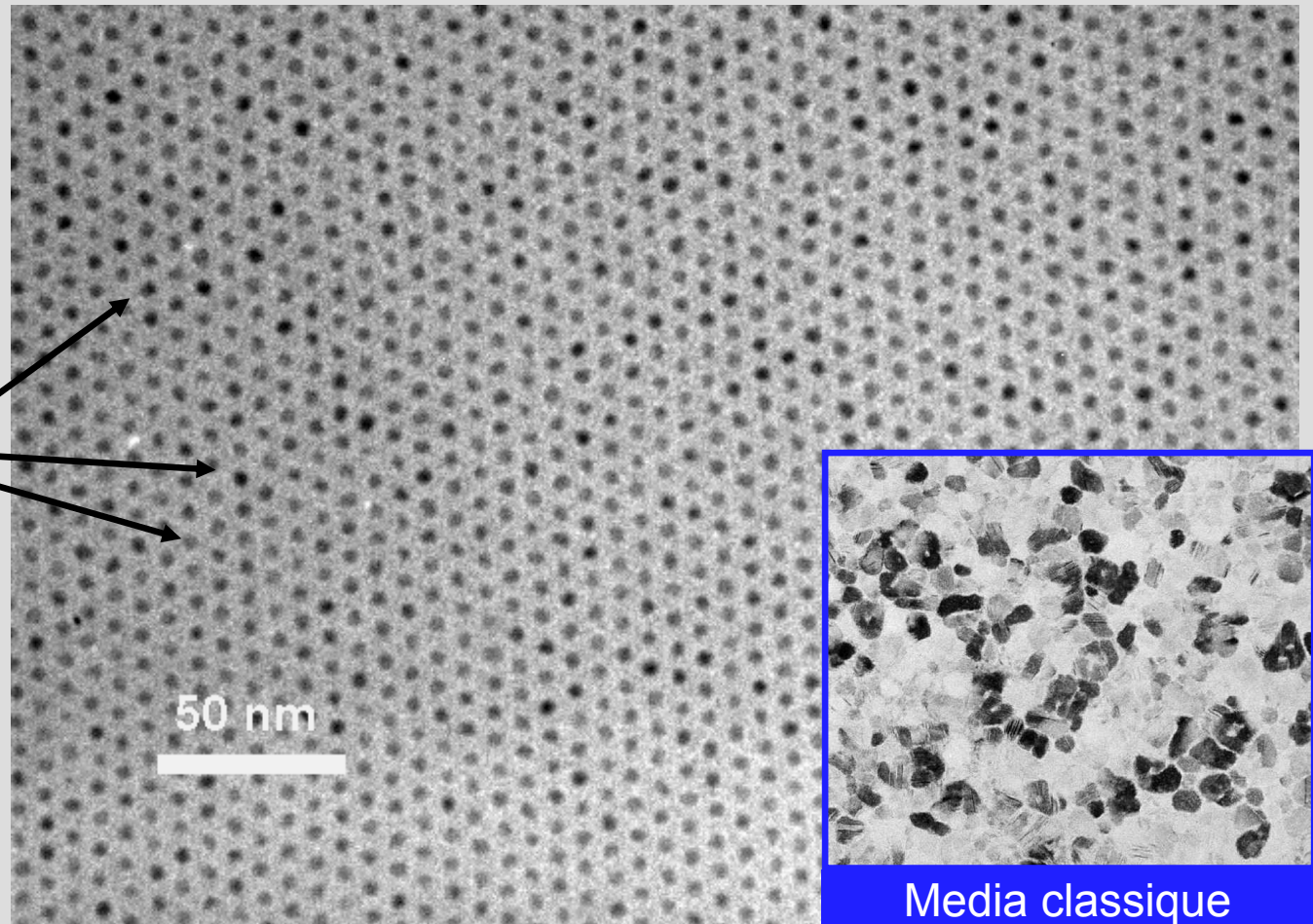
(Densité recherchée : Tbit/in²)

vue en coupe

"1" "0" "1" "0"



Diamètre : 6 nm



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

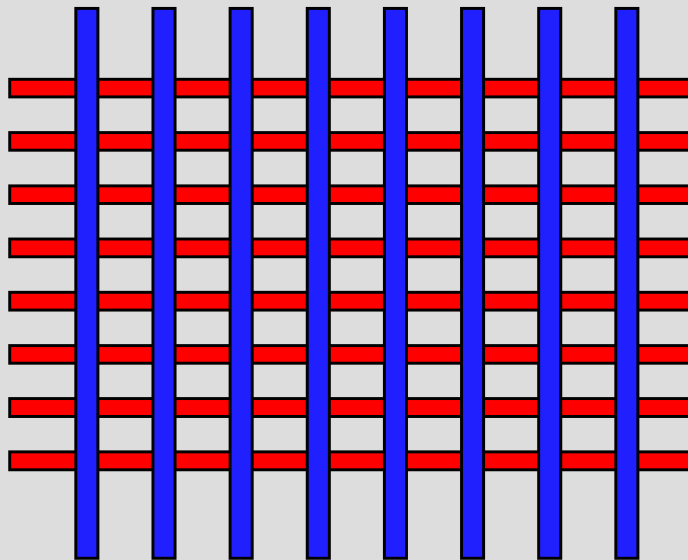
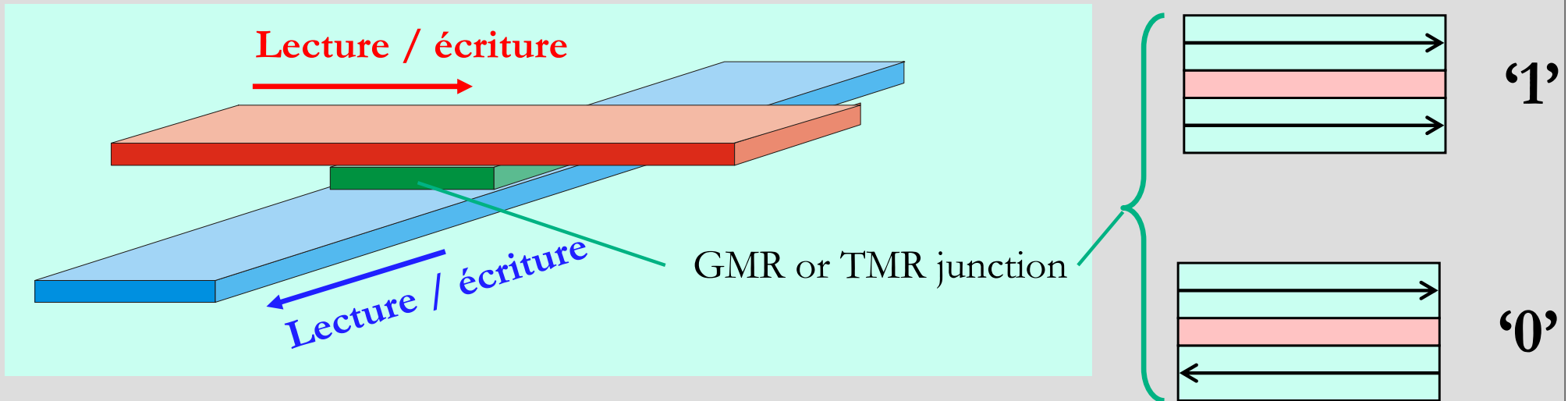
3. MRAMs: Mémoires magnétiques à accès aléatoire

4. Perspectives et conclusion



MRAM = Magnetic Random Access Memory

1 bit = 1 vanne de spin

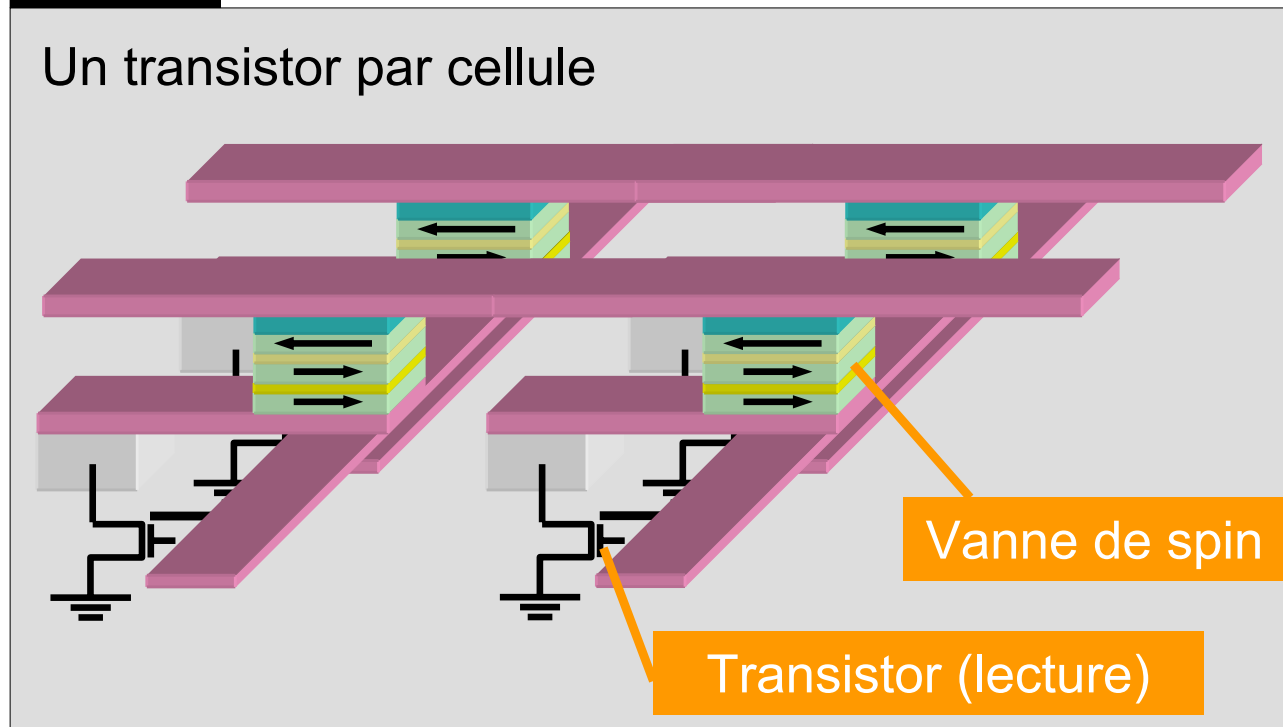


Mise en réseau sur puce
pour mémoire solide

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

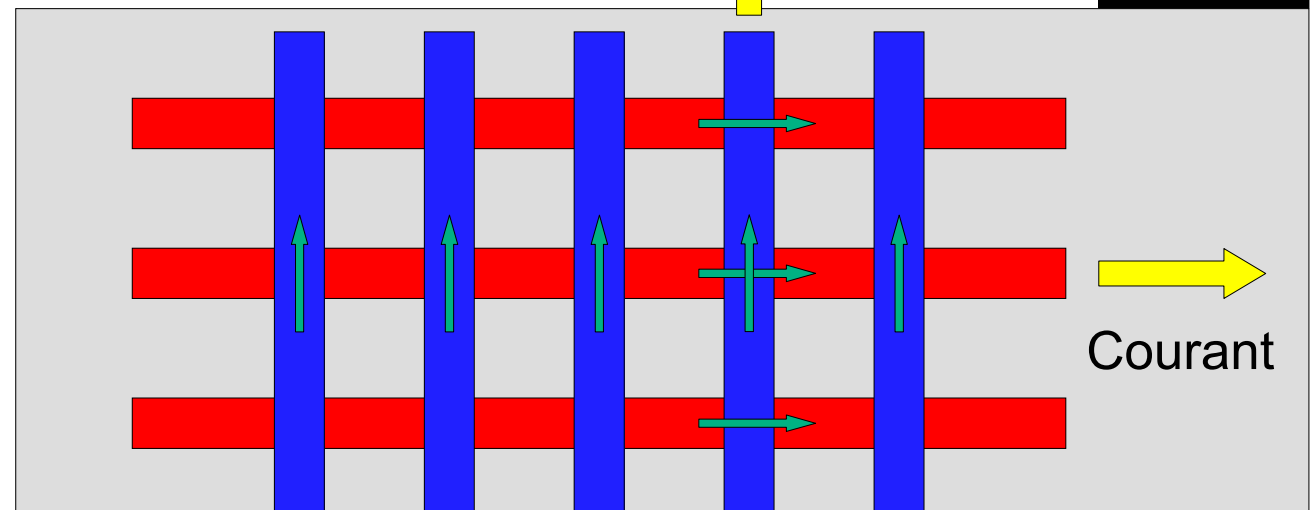
Lecture

Un transistor par cellule



Courant

Écriture

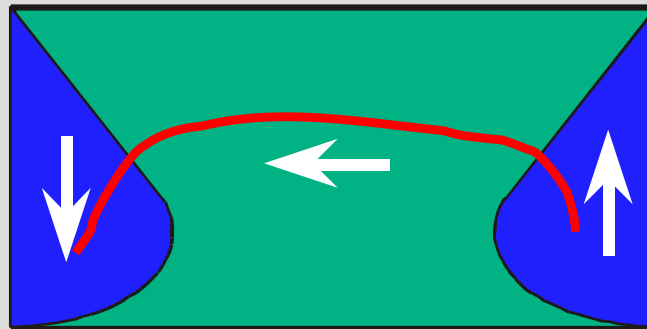


Courant

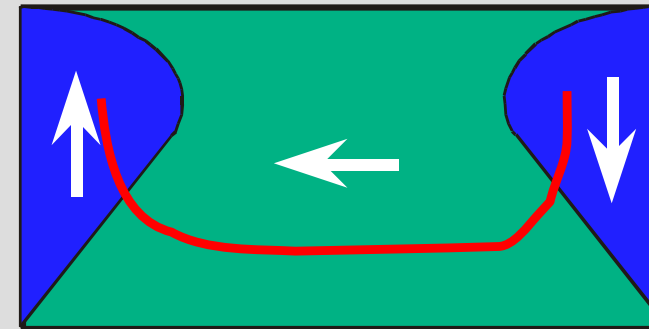
Sous-structures du monodomaine: domaines de bord

Au moins huit état quasi-dégénérés pour un bit !

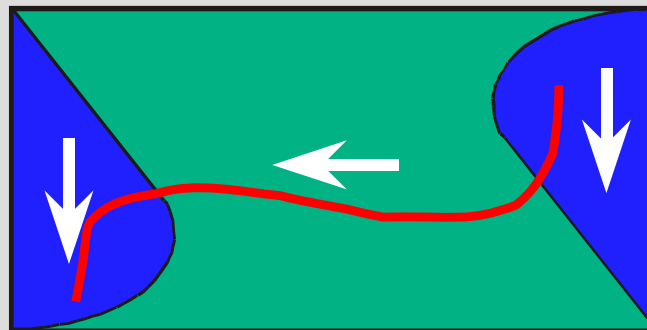
‘État C’



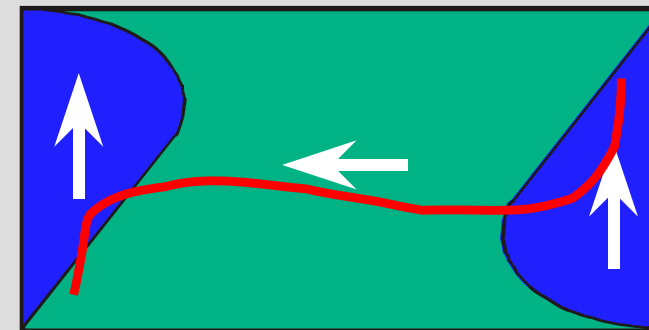
‘État C’



‘État S’

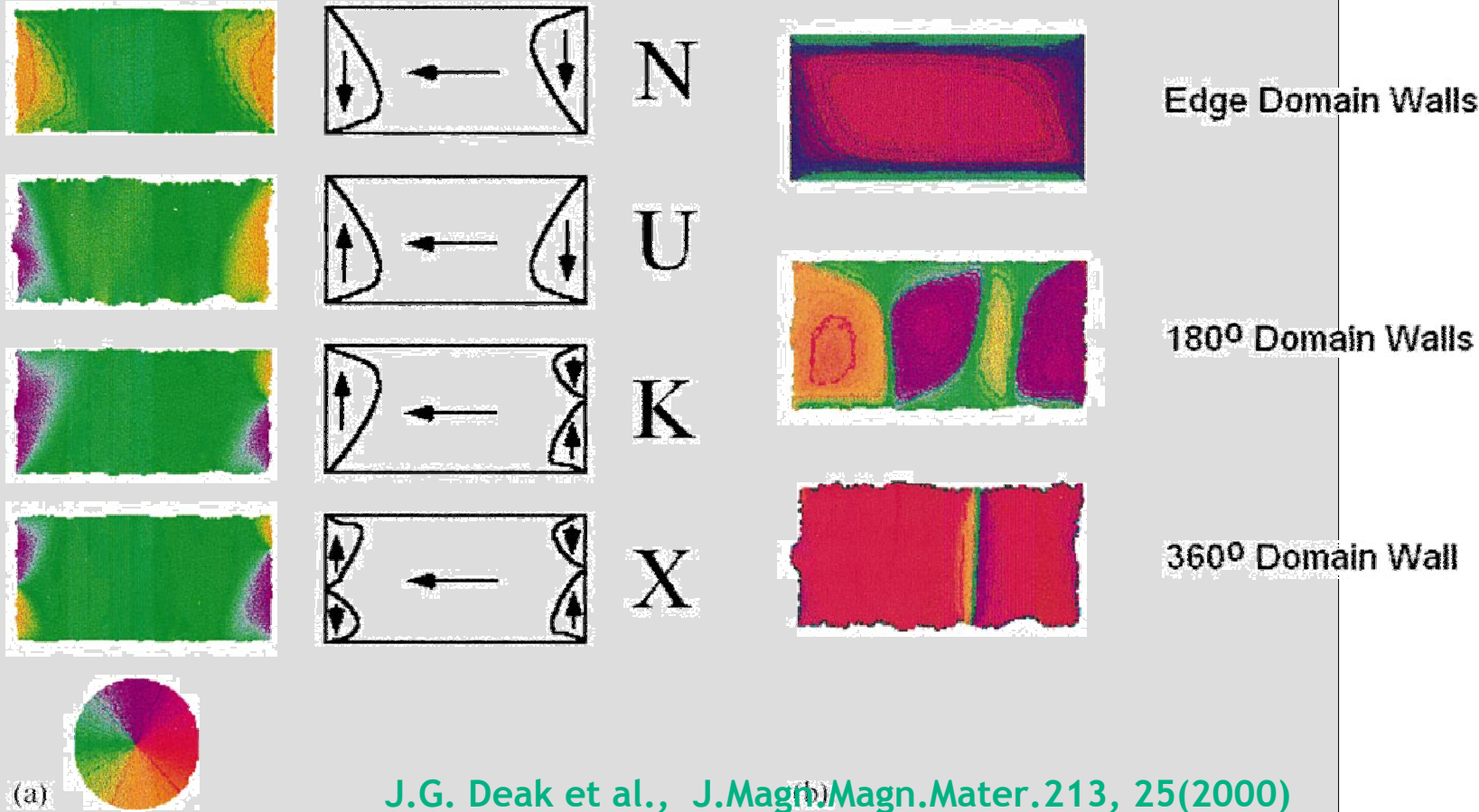


‘État S’



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:

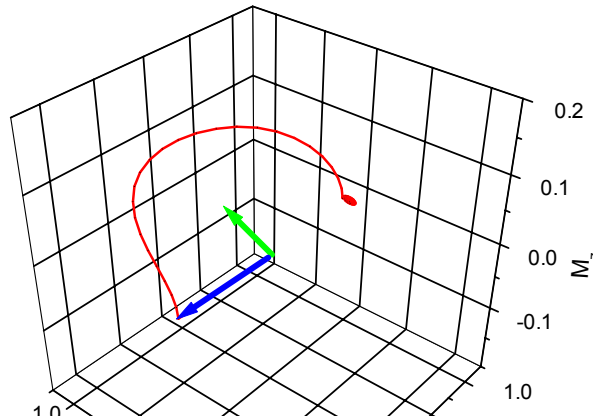
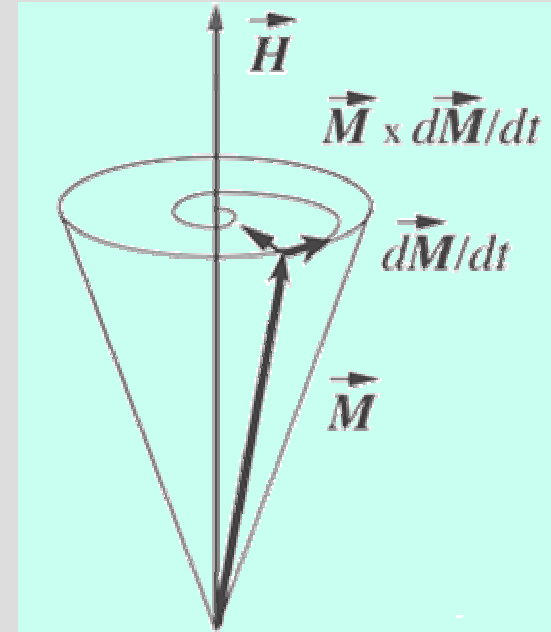
équation de Landau-Lifshitz-Gilbert

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

γ_0 : Facteur gyromagnétique

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

α : Coefficient d'amortissement

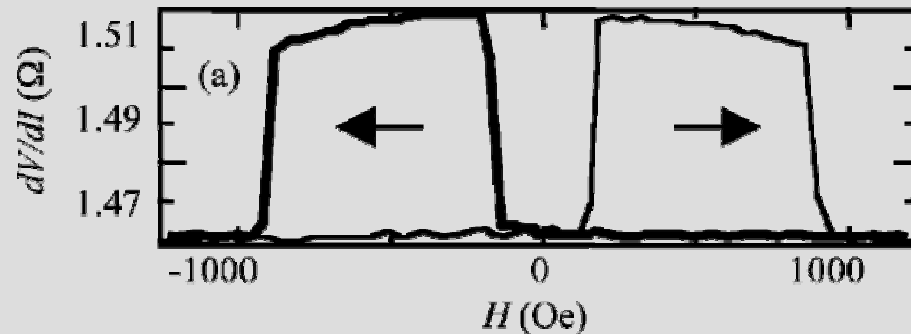


Renversement par champ transverse:
trajectoire de spin

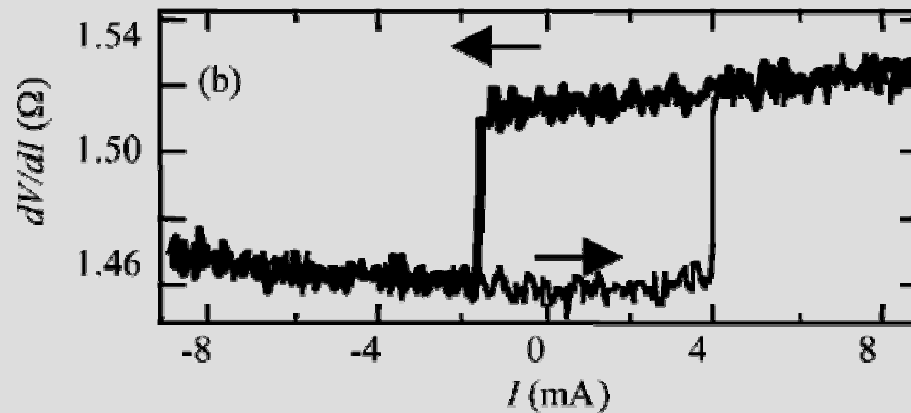
↻ Temps caractéristique: 0.1ns
↻ Prise en compte dans MRAMs
↻ Peu de pertes

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/Écriture 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 âge 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)

