

L'enregistrement magnétique, une nanotechnologie grand public

Claude Chappert
Institut d'Electronique Fondamentale
UMR CNRS – Université Paris Sud

Notre "Société de l'Information et de la Communication" est aussi basée sur un formidable progrès dans les techniques de stockage de l'information, et en particulier l'enregistrement magnétique !

Ce progrès est basé sur une recherche très fondamentale "Nano" (~ 5 à 9 ans d'une découverte à un produit dans le magnétisme)

... la diffusion du "disque dur" (HD: hard disk)...

**Projection Hitachi 2005:
~ 10 HDs par famille en 2005**



**ultra portable
(SONY VAIO)**



**Apple
iPod**

**graveur DVD+disque dur
(PHILIPS)**



**téléphone portable avec
disque dur (Samsung)**



**disque dur Toshiba
0.85-inch (~ 2 cm !)
→ appareil photo
→ tél. portable**



Un stockage non volatile, réinscriptible

➔ www.sims.berkeley.edu/research/projects/how-much-info-2003 :

- *le volume d'information "digitale" nouvellement créée augmente au rythme de +30% par an*
- *92% de ce volume a été stocké sur support magnétique en 2002*

➔ marché total de *l'enregistrement magnétique* : ~ 60 Milliards de \$

➔ ~ 230 Millions de disques durs vendus en 2004
(> nombre de téléviseurs vendus)

Comment est-on arrivé à ce développement ?
(cas particulier du disque dur)

Est-ce que ça peut durer ?

→ quelle "nanoscience magnétique" pour aujourd'hui et pour demain ?

... et quelle concurrence ?

L'échelle nanométrique

1 nanomètre = 10^{-9} m



↖ **1 nanomètre ~ 4 atomes**

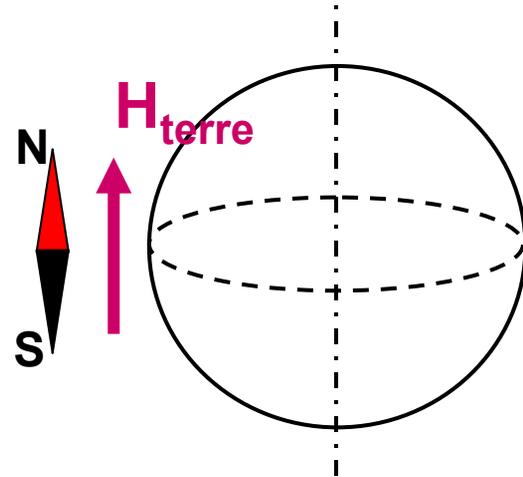
Quelques ordres de grandeur sur l'enregistrement

- stockage binaire de l'information: **1 bit** = "0" ou "1"
- **1 octet** (= 1 "Byte") = mot de 8 bits
- **1 Méga** octet = 1 Mo = un million d'octets (= 1 MB)
- **1 Giga** octet = 1 Go = un milliard d'octets (= 1 GB)

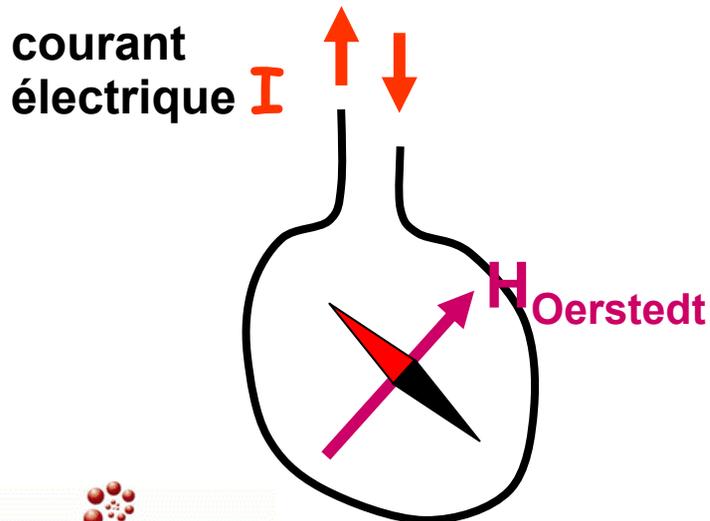
- **100 Go** = 80 h de vidéo TV standard → "magnétoscope"
 ou **9 h de TV haute définition** → caméra video

1 – la boussole:

petite aiguille de matériau aimanté, montée sur un pivot, et qui pointe le Nord "géomagnétique" en s'alignant sur le champ magnétique terrestre



2 – l'expérience d'Oerstedt



un courant dans un circuit électrique crée un champ magnétique pour aligner la boussole

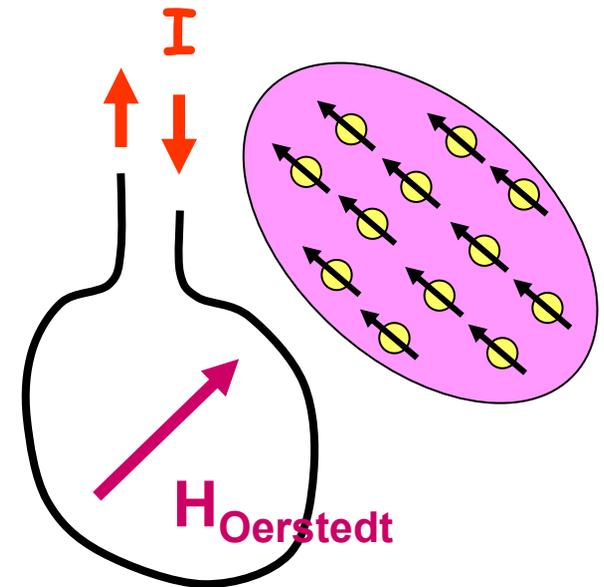
3 – matériau "aimanté"

- ~ assemblées de "nano-boussoles" atomiques,
- **gardées localement parallèles par l'interaction d'échange** entre atomes voisins

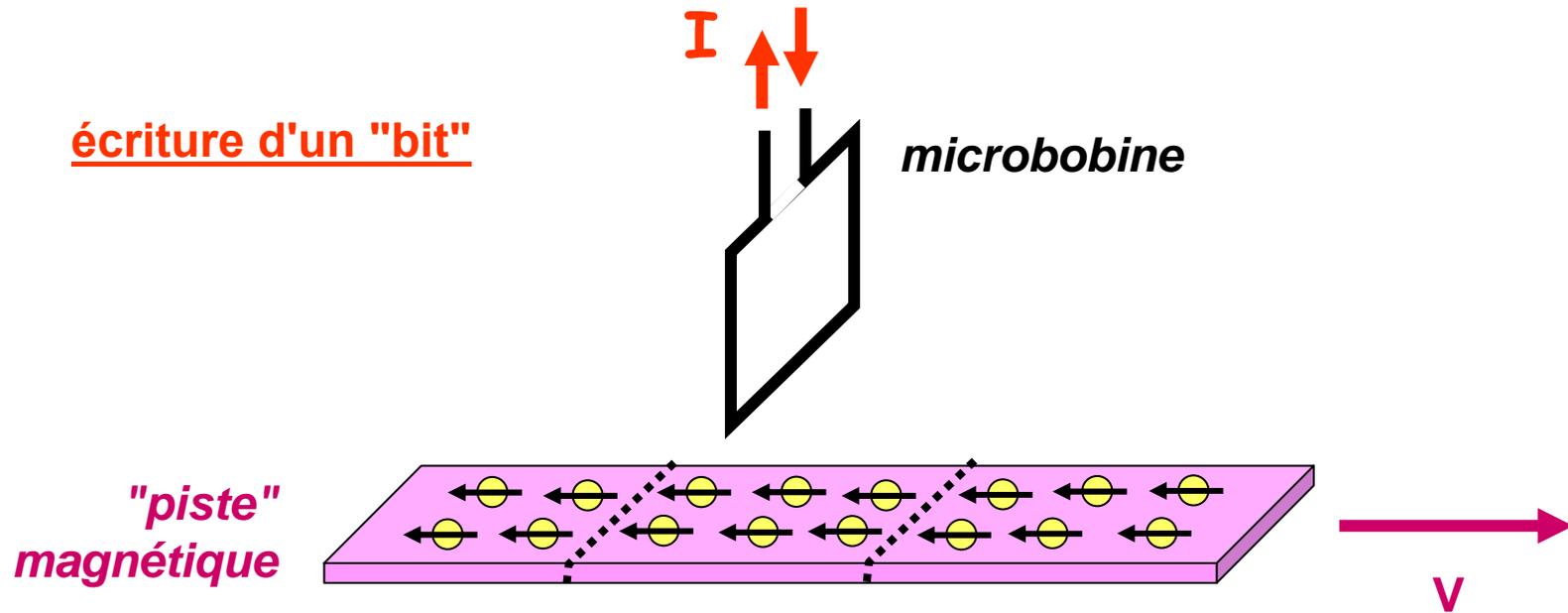
aimantation M = moment magnétique moyen local par unité de volume

4 – effet d'un champ magnétique

permet d'orienter l'aimantation d'un matériau ferromagnétique



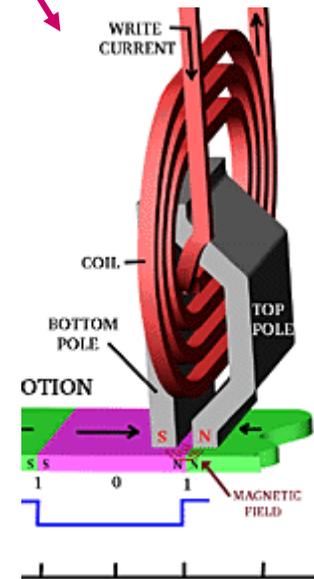
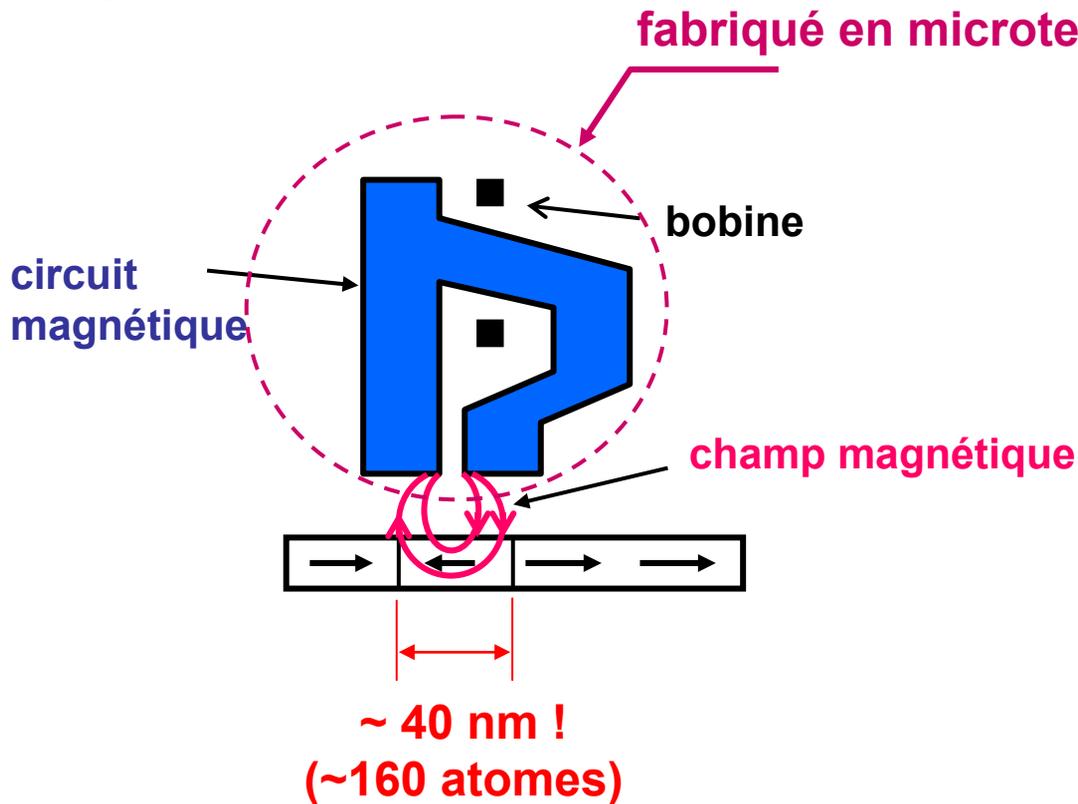
Principe de l'enregistrement magnétique (1)



le champ magnétique créé localement par la microbobine permet d'orienter l'aimantation d'un petit domaine d'un matériau magnétique en couche mince

Systeme d'écriture "réaliste"

un "*entrefer*" *magnétique* permet de *renforcer* et de *localiser* le champ magnétique

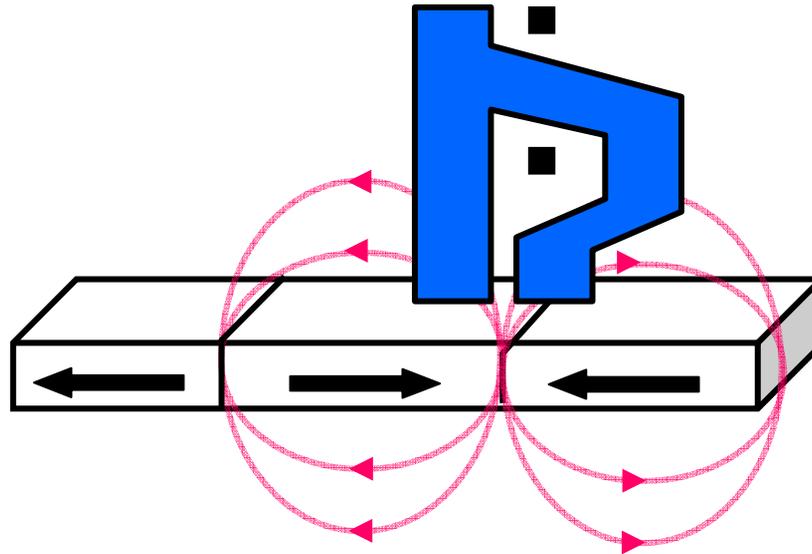


© Readrite

Lecture

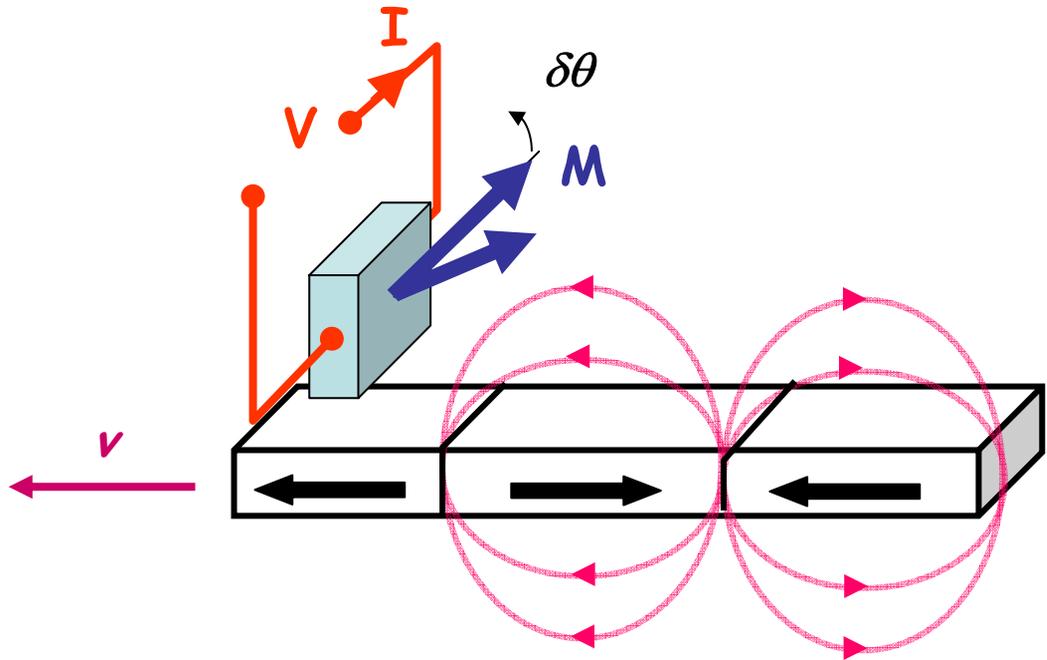
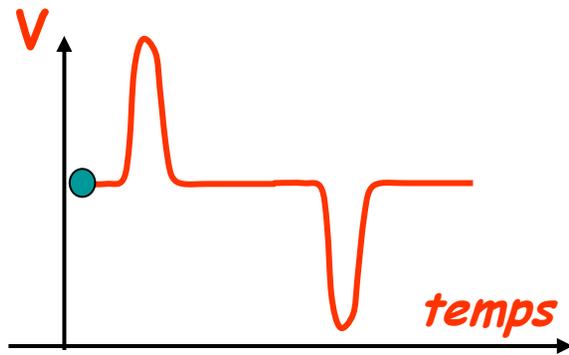
on vient détecter le champ magnétique créé au niveau des parois entre deux domaines

→ bit "1" ou "0" = présence /absence d'une paroi à un point donné de la piste



*Ancienne technique: détection par mutuelle inductance dans une bobine.
De moins en moins sensible quand on réduit les dimensions.*

Tête de lecture "magnétorésistive" (1991)

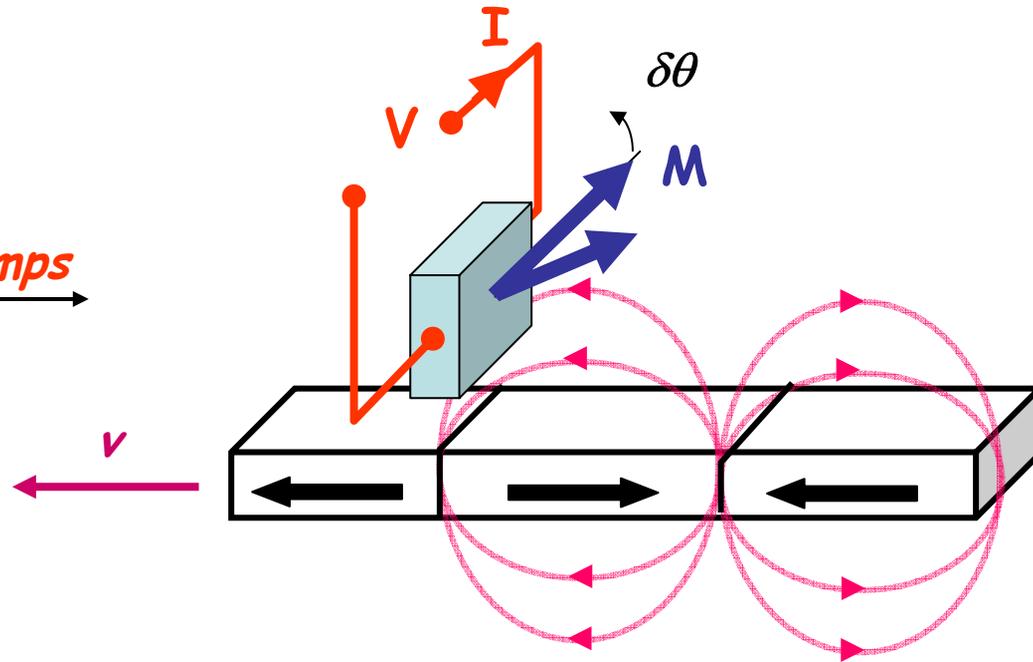
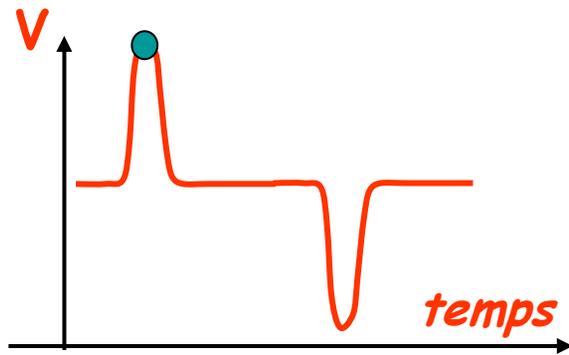


- la résistance d'un "barreau" magnétique varie avec l'orientation de l'aimantation, sensible au champ de fuite des « bits »

$$R = R_0 + \Delta R \sin(\delta\theta)$$

$$\Delta R/R \sim 1\%$$

Tête de lecture "magnétorésistive" (1991)

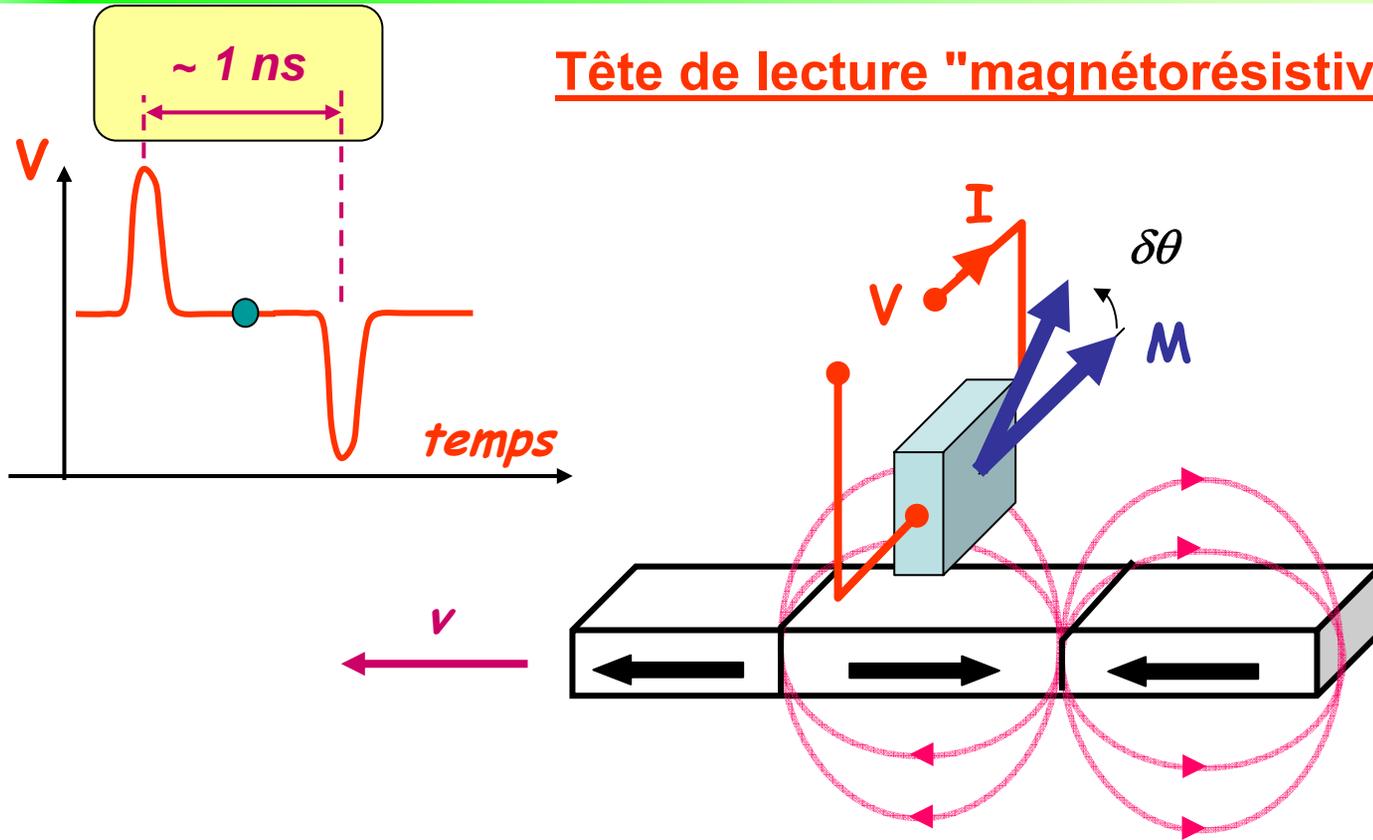


- la résistance d'un "barreau" magnétique varie avec l'orientation de l'aimantation, sensible au champ de fuite des « bits »

$$R = R_0 + \Delta R \sin (\delta \theta)$$

$$\Delta R/R \sim 1\%$$

Tête de lecture "magnétorésistive" (1991)



- la résistance d'un "barreau" magnétique varie avec l'orientation de l'aimantation, sensible au champ de fuite des « bits »

$$R = R_0 + \Delta R \sin (\delta \theta)$$

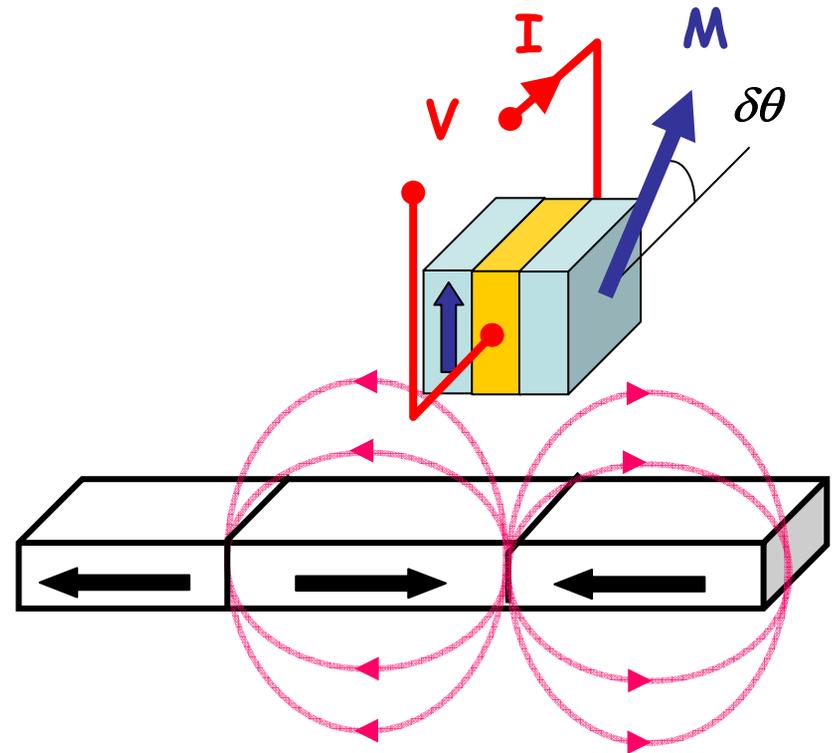
$$\Delta R/R \sim 1\%$$

- par la résistance d'un dispositif de type « vanne de spin » (1997)

(Magnétorésistance géante, A. Fert et al., Orsay 1988)

$$R = R_0 + \Delta R \sin(\delta\theta)$$

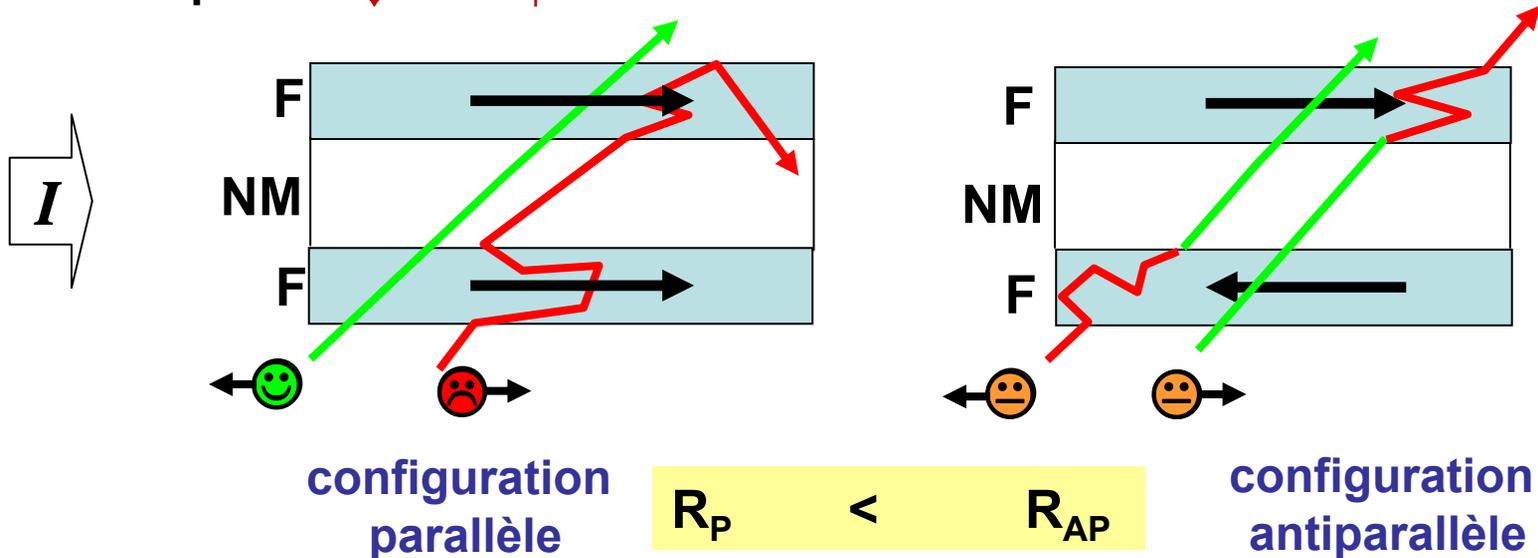
$$\Delta R/R \sim 10 \%$$



→ les électrons de conduction ont **une charge et un "spin"** (\uparrow ou \downarrow)

→ dans un métal ferromagnétique, le **"libre parcours moyen"** λ d'un électron dépend de la direction de son spin par rapport à l'aimantation,

par exemple: $\lambda_{\downarrow} \gg \lambda_{\uparrow}$

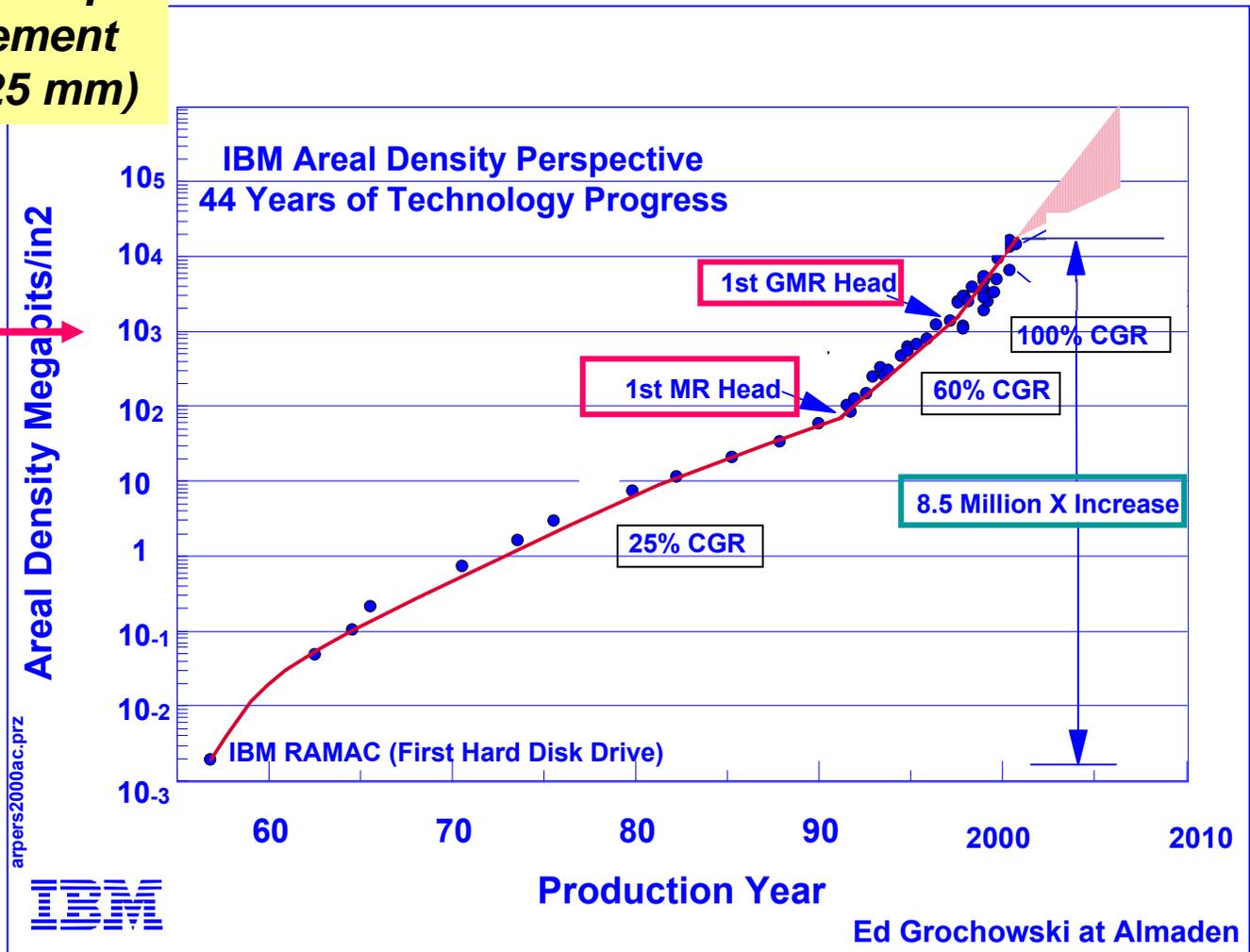


$$\lambda_{\uparrow}, \lambda_{\downarrow} \sim \text{nm} \gg t_{\text{couches}} !!!$$

Le disque dur (2) : une progression des performances accélérée par les sauts technologiques

densité surfacique d'enregistrement
(1 "inch" ~ 25 mm)

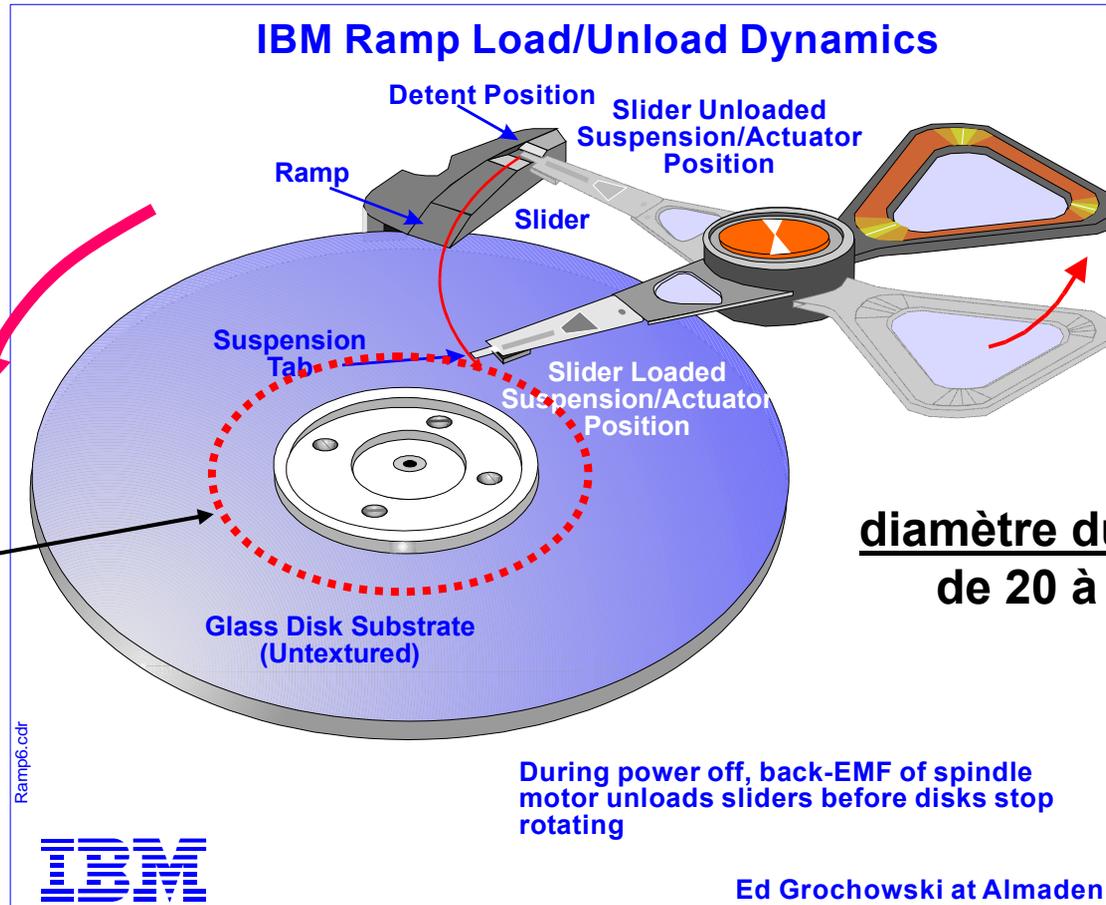
1 Gbit/in²
~
1,5 bit / μm²



Le disque dur (1) : c'est aussi un système mécanique hautement sophistiqué ...

Vitesse :
7500 à
10000 trs/mn

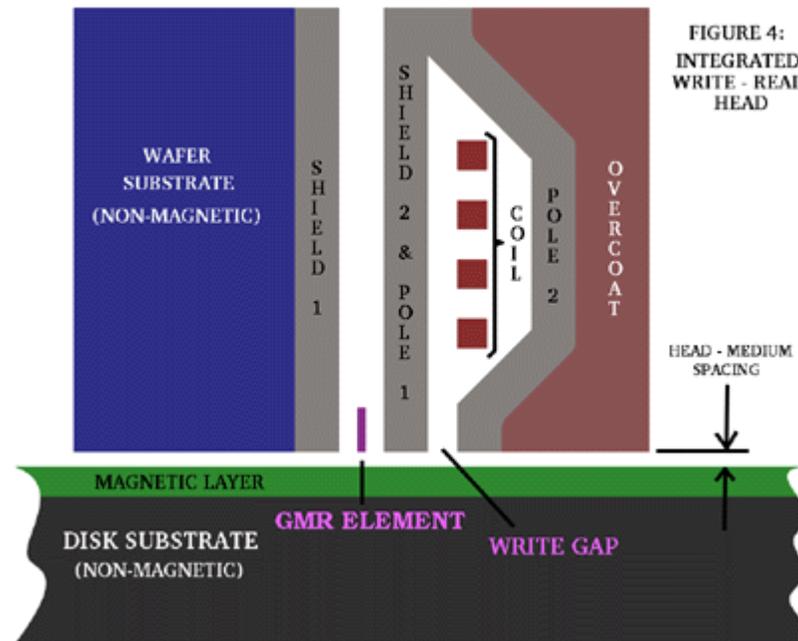
piste
circulaire



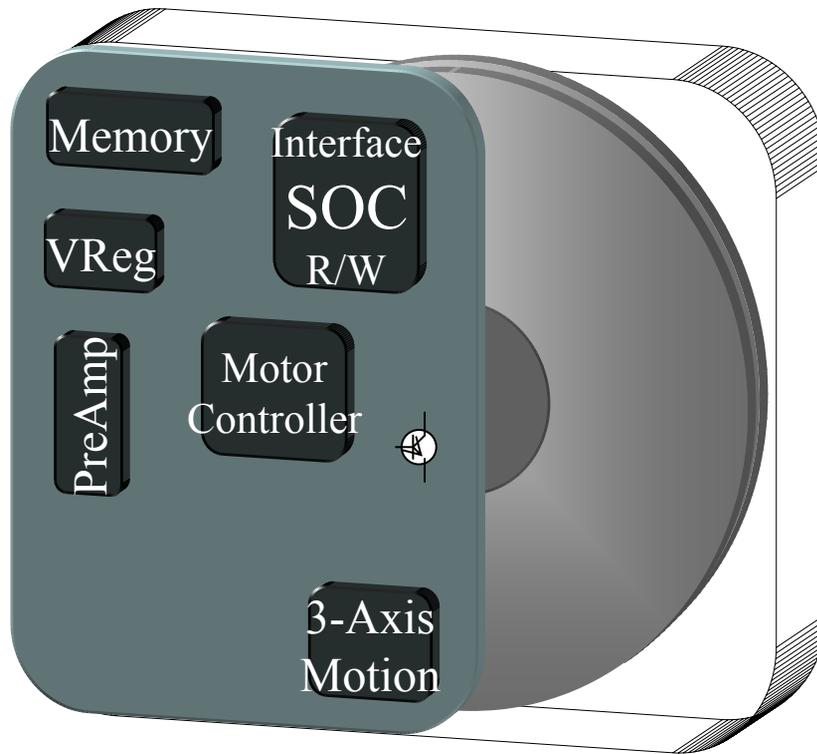
diamètre du disque :
de 20 à 65 mm

... une tête de lecture/écriture de très haute technologie ...

- **têtes de lecture et d'écriture sont fabriquées ensemble, en grande série, par les même méthodes de microtechnologie que les circuits semiconducteurs**



© Readrite



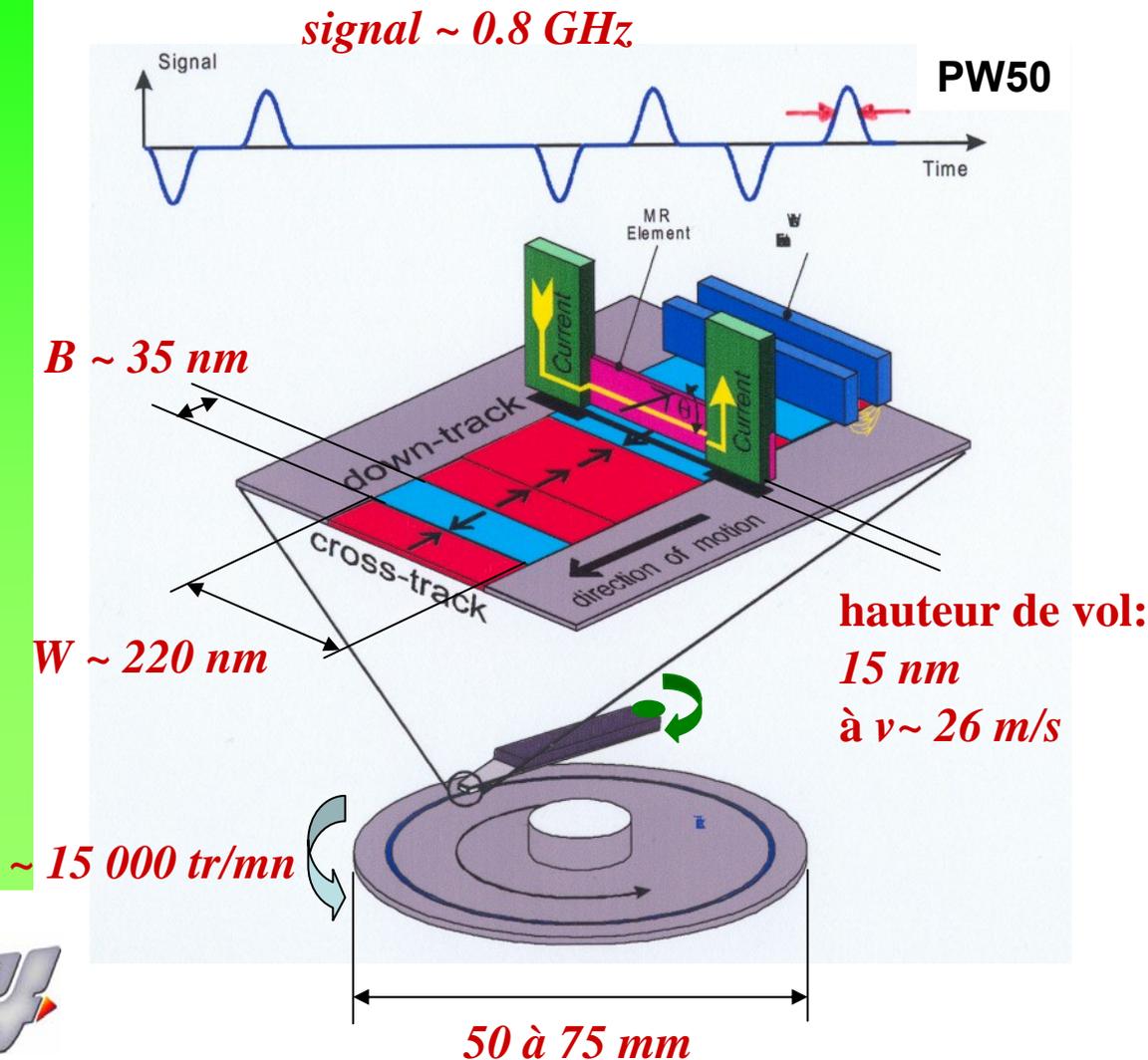
Les composants électronique pour le disque dur:

- un marché de ~3 Milliards de \$
- **ST Microelectronics n°2 mondial**



Disque dur: l'état de l'art

Un produit 2004: 80 GBit/in²



Dans le futur:

- **Demos 2004 : 150 Gbit/in²**
 $B = 30 \text{ nm}, W = 194 \text{ nm}$

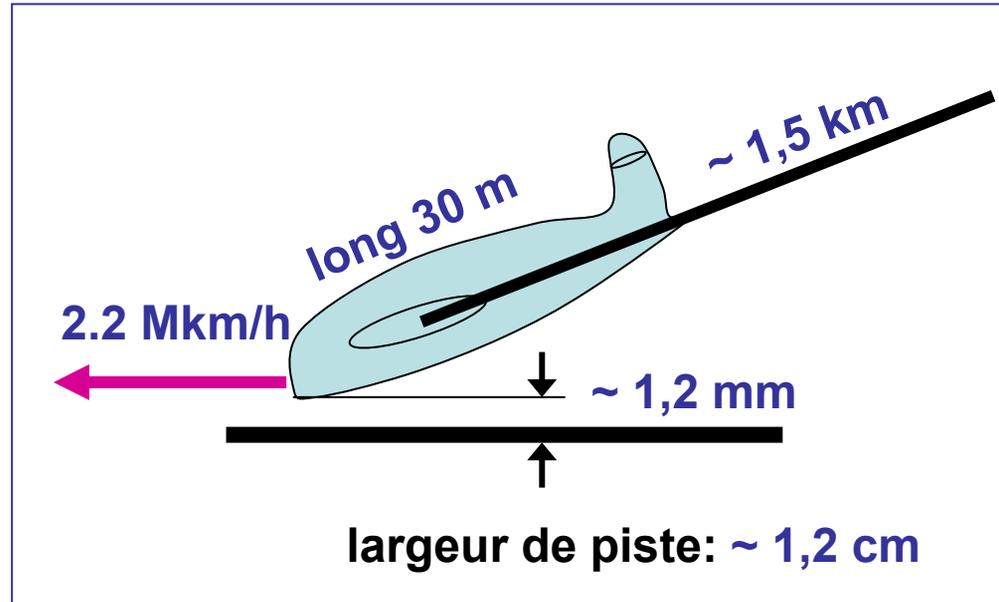
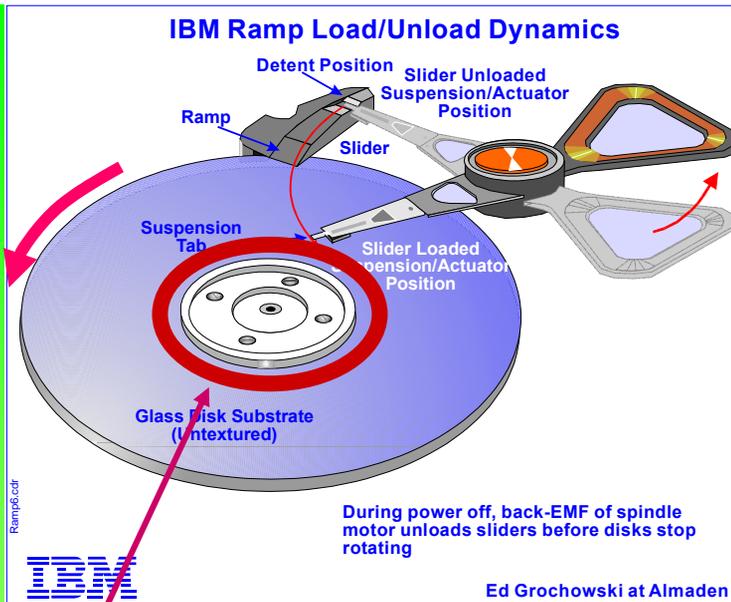
- **1 Tbit/in²**
 $B = 10 \text{ nm}, W = 64 \text{ nm}$

- **écriture rapide : $< 1 \text{ ns}$**
- **non volatilité $> 10 \text{ ans}$**

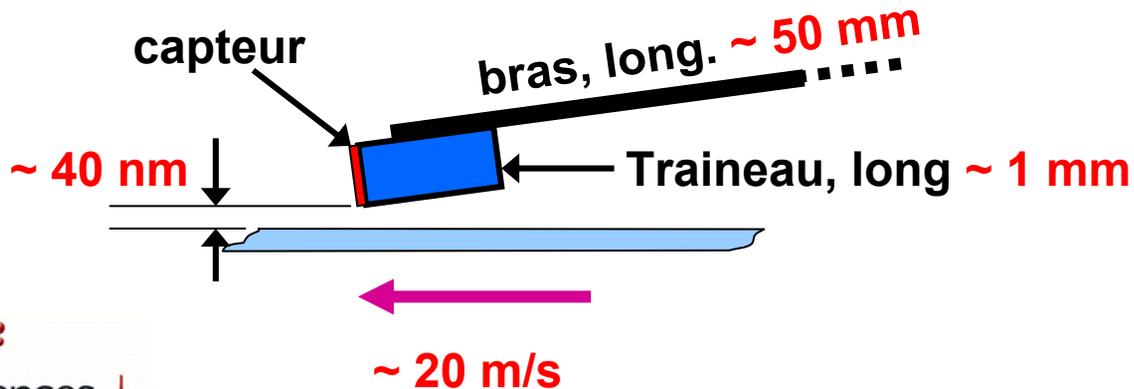
\rightarrow gamme de $3 \cdot 10^{17} !$

• ...

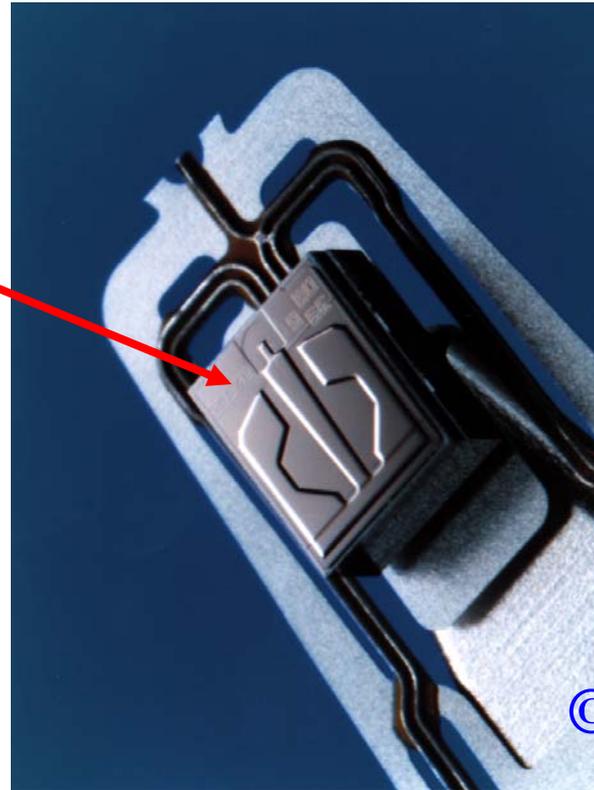
... remis à l'échelle macroscopique



Piste magnétique, largeur ~ 400 nm

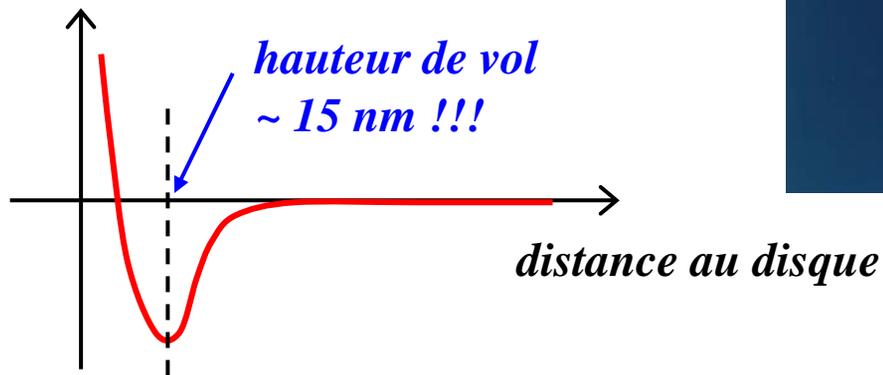


face profilée du "patin"
en regard du disque
(effet "de sol")



© PHS-Silmag

énergie d'interaction

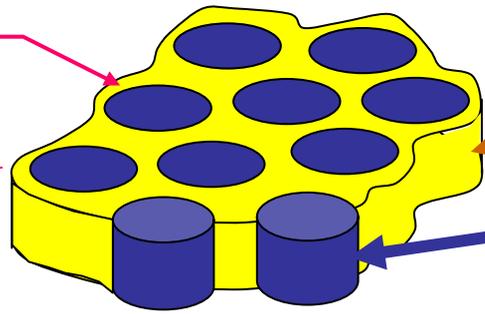


Les limites du disque dur (1) : "casser" l'interaction d'échange entre moments magnétiques atomiques

→ film magnétique "granulaire"

taille de grain D

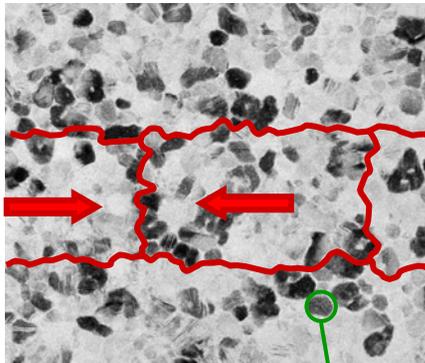
épaisseur e



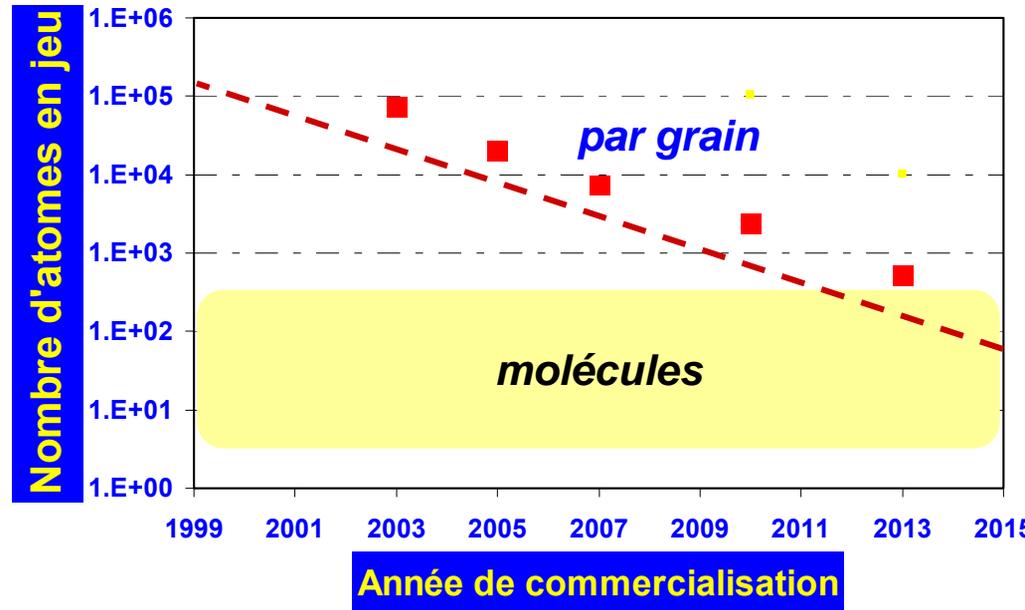
"liant" non magnétique (Cr, SiO₂, C, ...)

Grain colonnaire d'alliage magnétique

ex : produit "Seagate" 2003



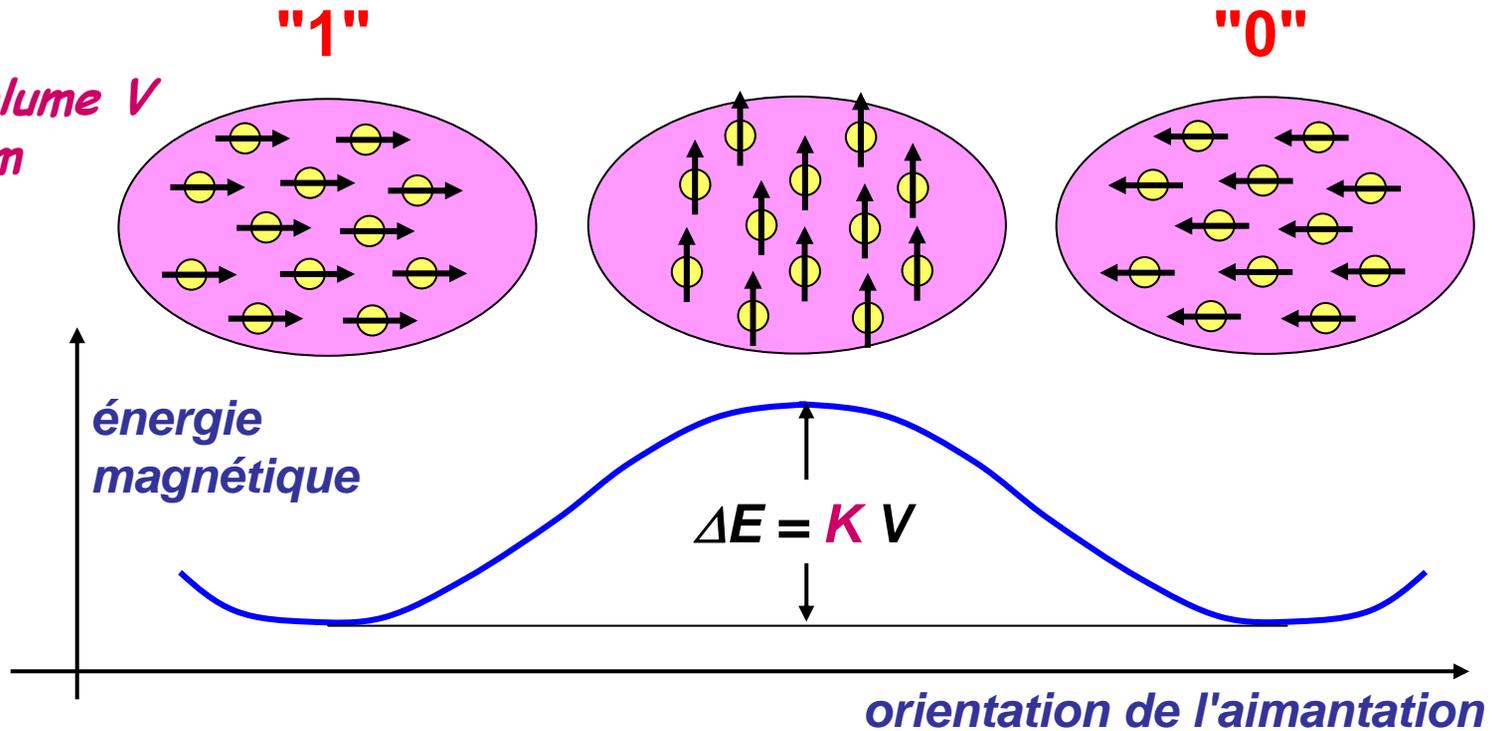
1 bit = ~100 grains
de diamètre $D_{\text{grain}} = 9 \pm 2 \text{ nm}$
d'épaisseur ~ 10 nm



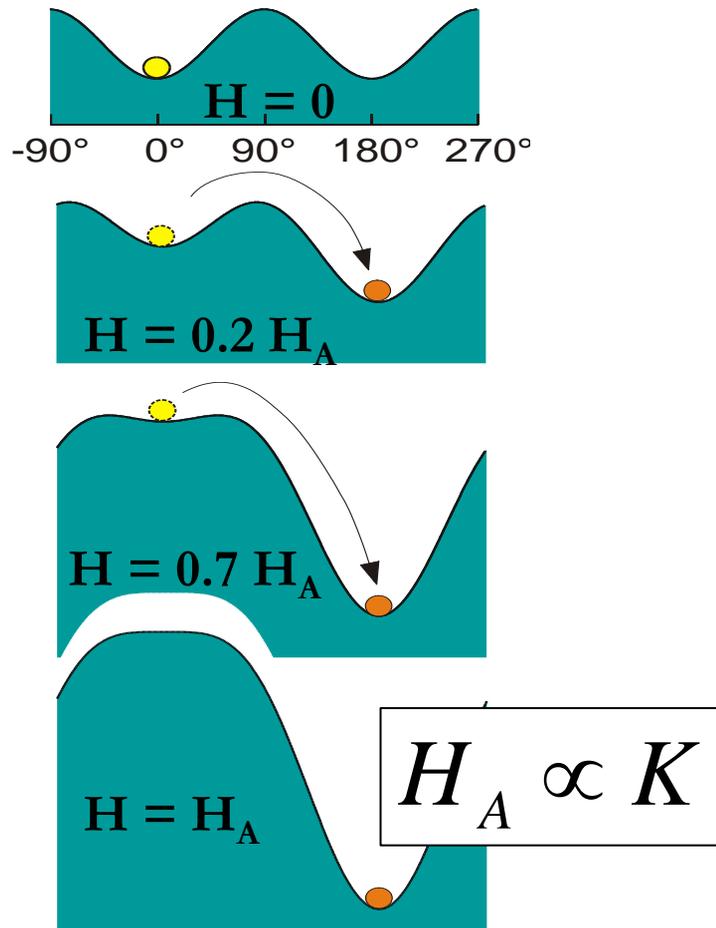
Les limites du disque dur (2) : principe du stockage magnétique non volatile ...

La "non volatilité" du stockage est assurée par
l'anisotropie de l'énergie magnétique

*grain de volume V
dans un film
magnétique*



écriture en champ



non volatilité en champ nul: activation thermique

Probabilité de non renversement
après un temps t :

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

temps caractéristique :

$$\tau = \tau_0 \exp(\Delta E(H, T) / k_B T)$$

stabilité sur 10 ans = $3 \cdot 10^8$ s

taux d'erreur :

$$1-P = 10^{-6} \rightarrow KV \sim 54 k_B T$$

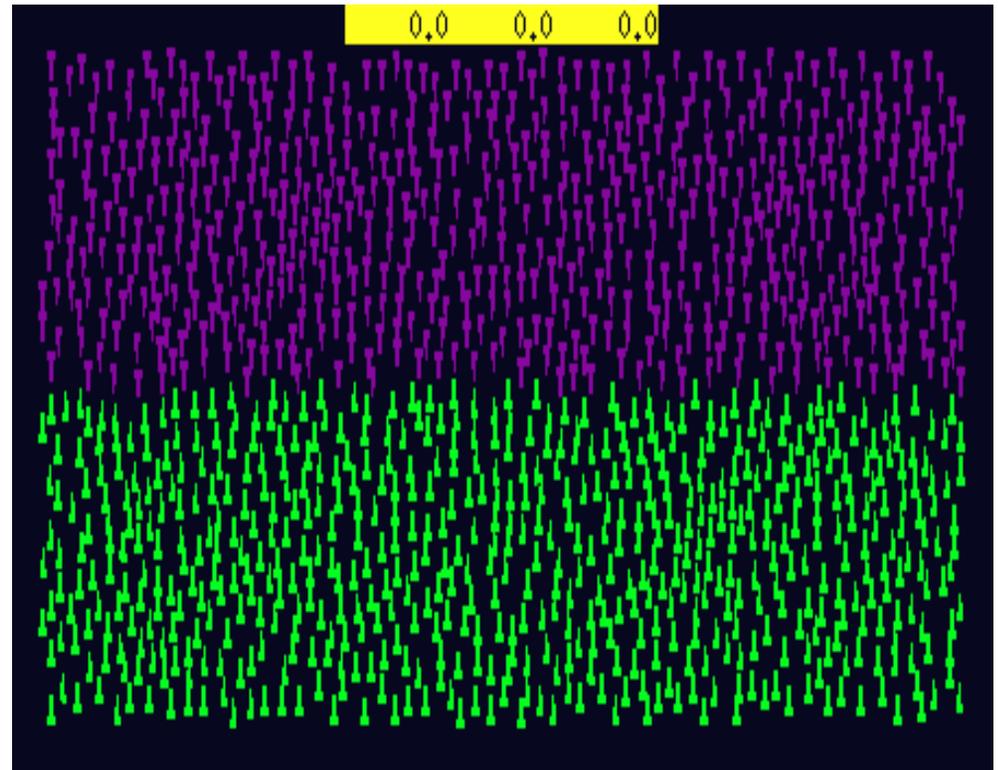
$$1-P = 10^{-12} \rightarrow KV \sim 68 k_B T$$

Les limites du disque dur (2) : ... poussé par l'interaction dipolaire magnétique ...

La perte d'information par activation thermique commence dans les parois entre domaines, à cause de ***l'interaction dipolaire magnétique*** entre grains



élargit les signaux
→ bruit à la lecture



© IBM Research

Les limites du disque dur (3) : *le triangle frustré*

Objectif: augmenter la
la densité d'enregistrement

diminuer le volume V
des grains

diminuer la puissance
nécessaire à l'écriture

stabilité thermique :

$$\Delta E = K V$$

→ augmenter K

+ sensibilité lecture

écriture :

le champ magnétique
d'écriture est prop. à K

→ diminuer K

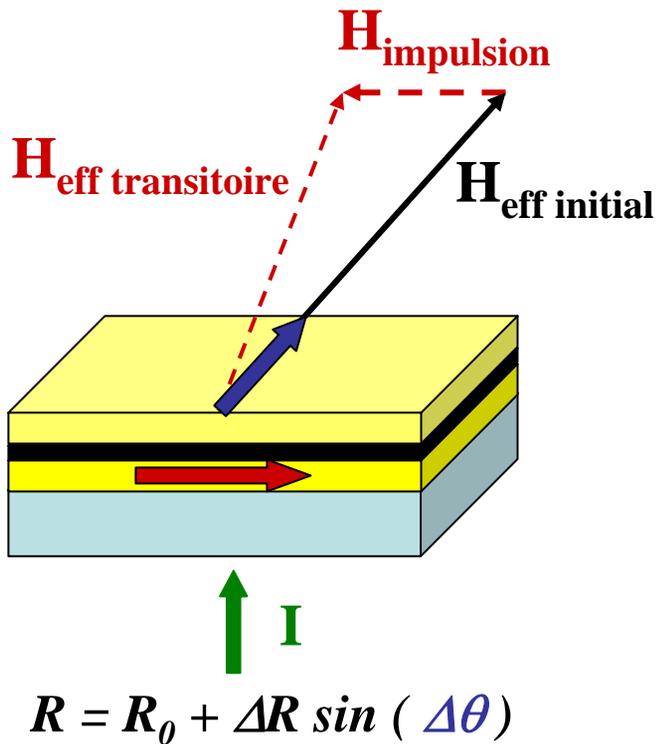


Recherche / Innovations constantes

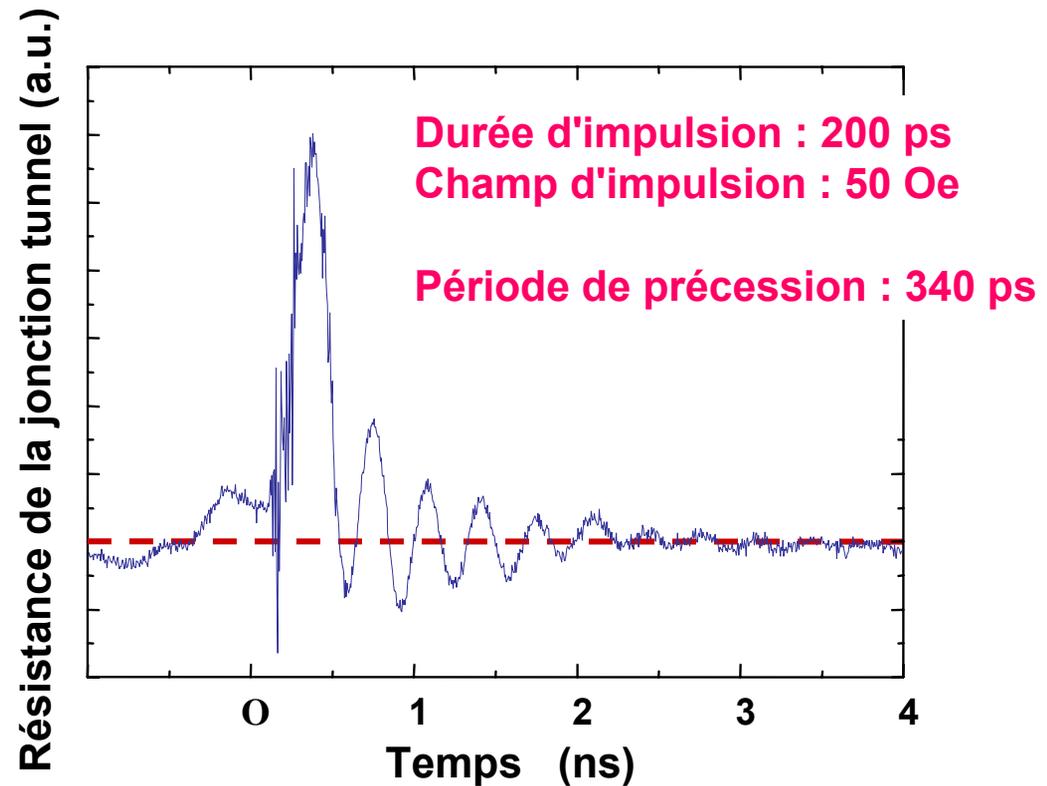
Vitesse de lecture d'une tête de lecture «vanne de spin»

La réponse temporelle d'une tête de lecture magnétique est limitée par les phénomènes fondamentaux de **précession** de l'aimantation

pseudo-tête de lecture

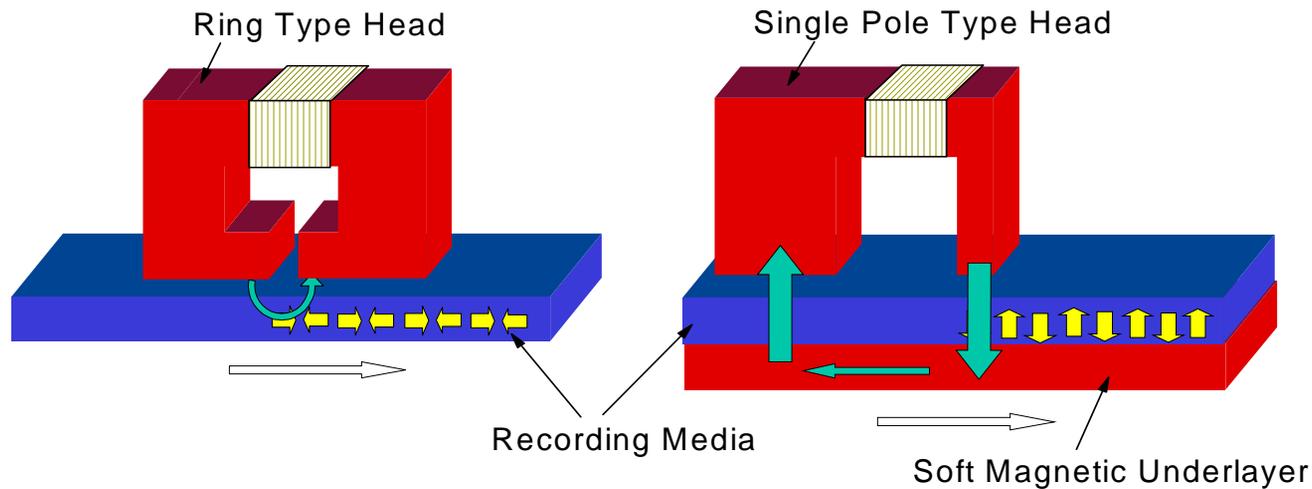


réponse impulsionnelle



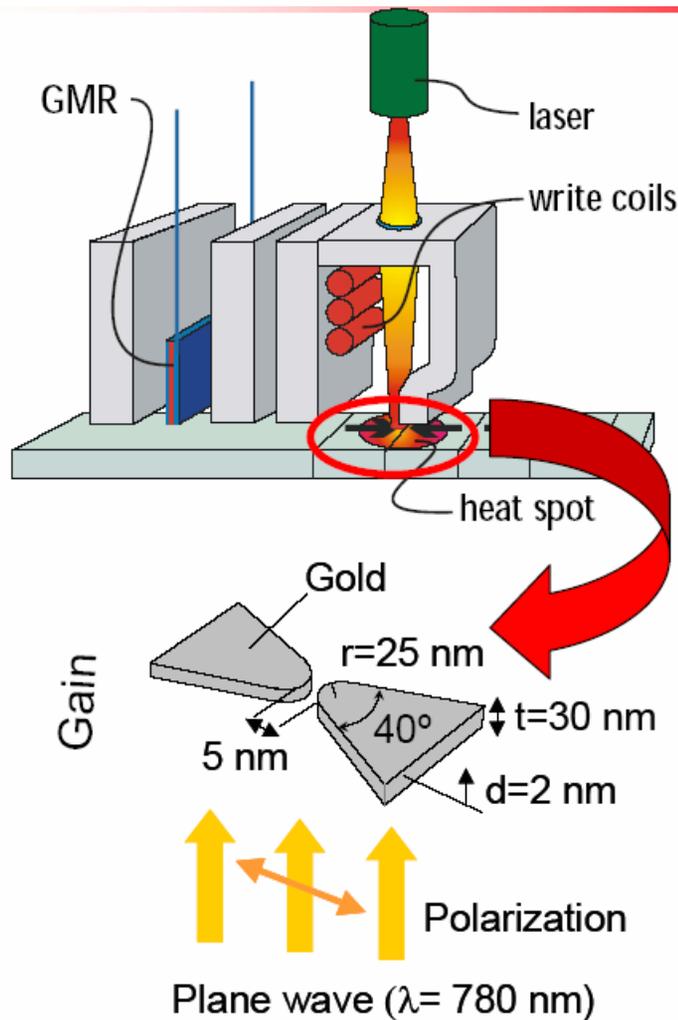
Quelques solutions "nano" ... et autres

Enregistrement perpendiculaire



- ➔ **Interaction dipolaire favorable** *aux très fortes densités*
- ➔ **Matériaux plus faciles à obtenir avec :**
 - => texture cristalline quasi parfaite
 - => K_U très élevés (ex: FePt)
- ➔ **Tête d'écriture plus efficace** ➔ **champs d'écriture plus élevés**

Premier produit commercialisé Juillet 2005 (Toshiba, ...)



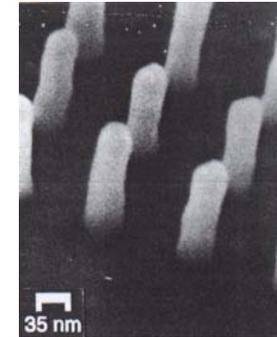
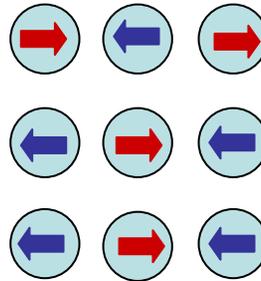
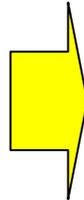
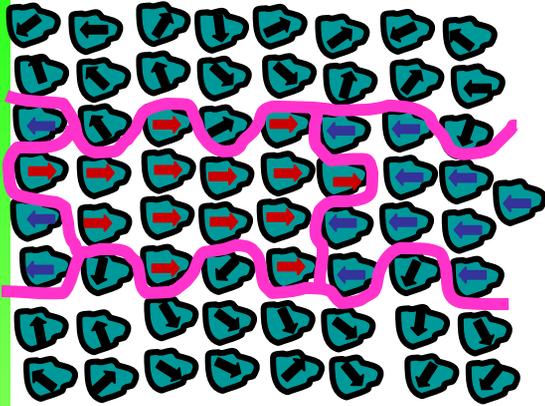
Une impulsion laser chauffe localement le film magnétique juste au moment de l'écriture, pour diminuer temporairement K (et donc le champ d'écriture)

Film d'enregistrement nanostructuré

Actuel : film granulaire
> 100 grains/bit

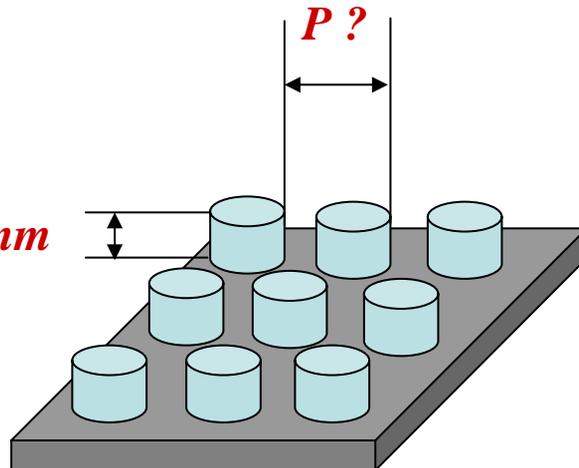
Proposition :
réseau de plots

S. Chou et al, JAP 75, 6673 (1994)
35 nm magnetic pillars,
65 Gbits/in² density



mais :

Rugosité ~10 nm

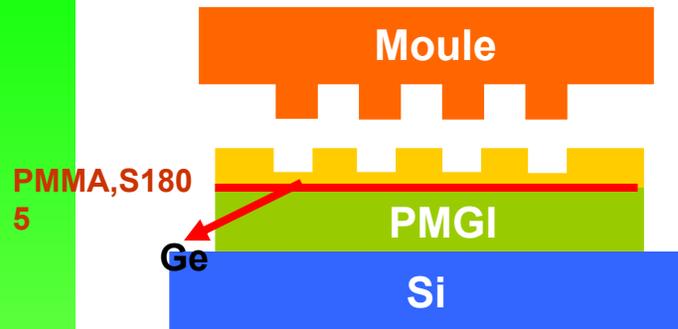


$P = 100 \text{ nm} \Rightarrow \sim 65 \text{ Gbits/in}^2$

$P = 50 \text{ nm} \Rightarrow \sim 256 \text{ Gbits/in}^2$

$P = 25 \text{ nm} \Rightarrow \sim 1 \text{ Tbits/in}^2$

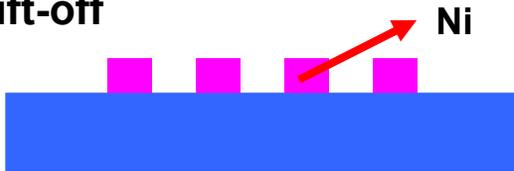
1. Impression de la 1ère couche:



2. Transfert dans le PMGI



3. Lift-off



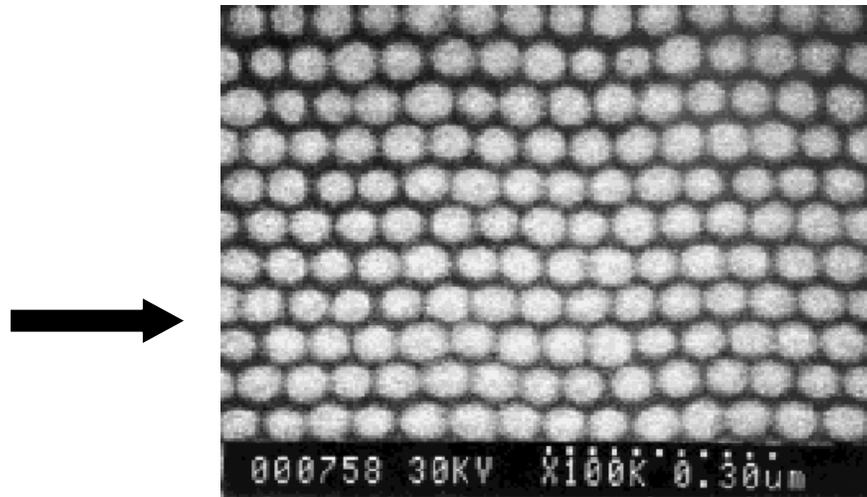
4. RIE du Si



Procédé de transfert tricouche :

1. Permet de transférer des réseaux denses de plots
2. Haute résolution (20 nm) et fort rapport de forme
3. Bonne homogénéité sur de grandes surfaces
4. Reproductibilité

Réseau de plots de Ni de pas 60nm



*Collaborations : Y.Chen, CNRS/LPN (Marcoussis);
JM.Bruneau, MPO (Grenoble);
C.Gourgon, CNRS/LTM (Grenoble)*

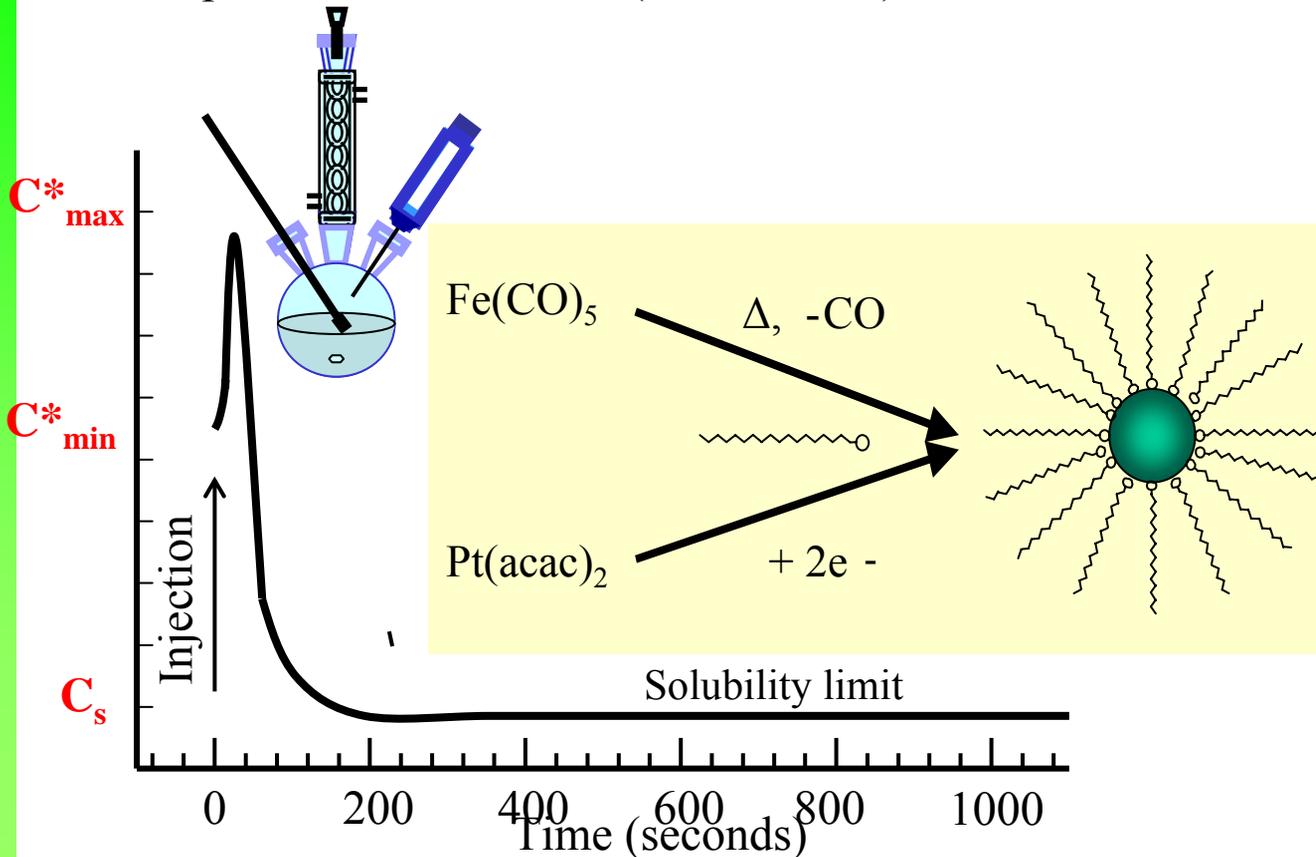
Film d'enregistrement auto-organisé

Route to Monodisperse Particle Arrays

1. Separate Nucleation and Growth

Monodisperse Colloid Growth (LaMer 1950)

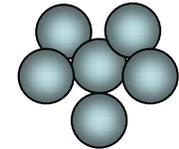
Concentration of solute in solution



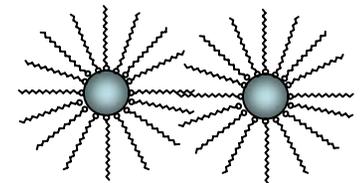
2. Prevent Agglomeration



Attractive Forces



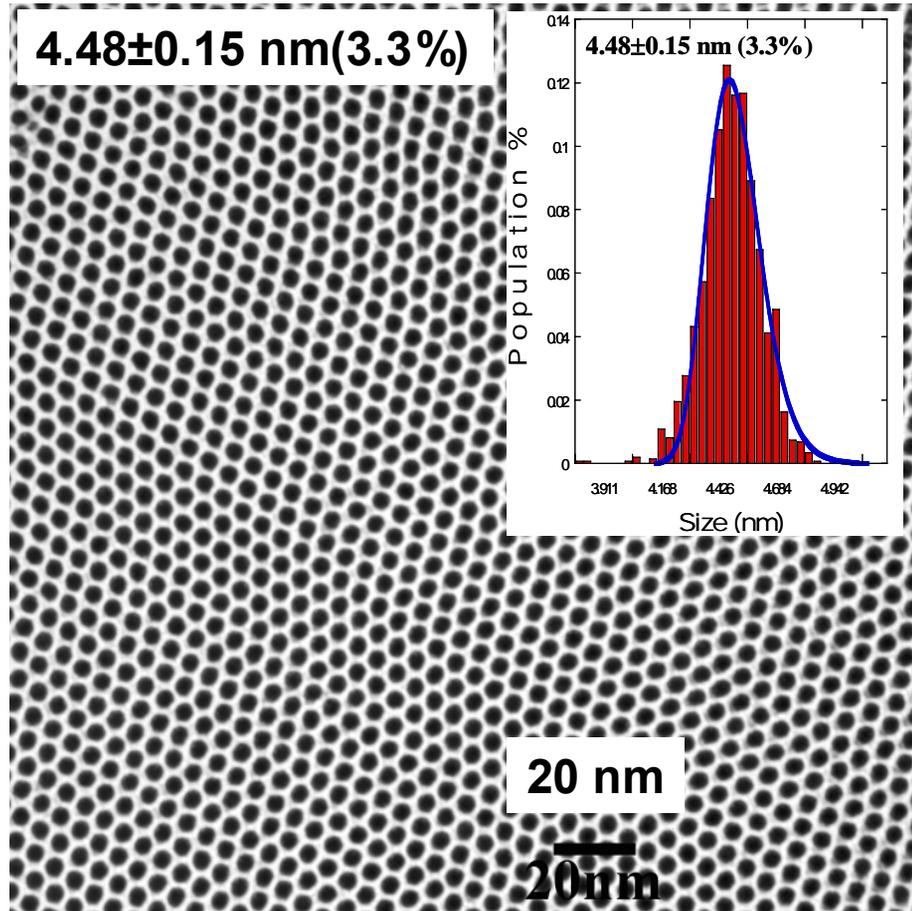
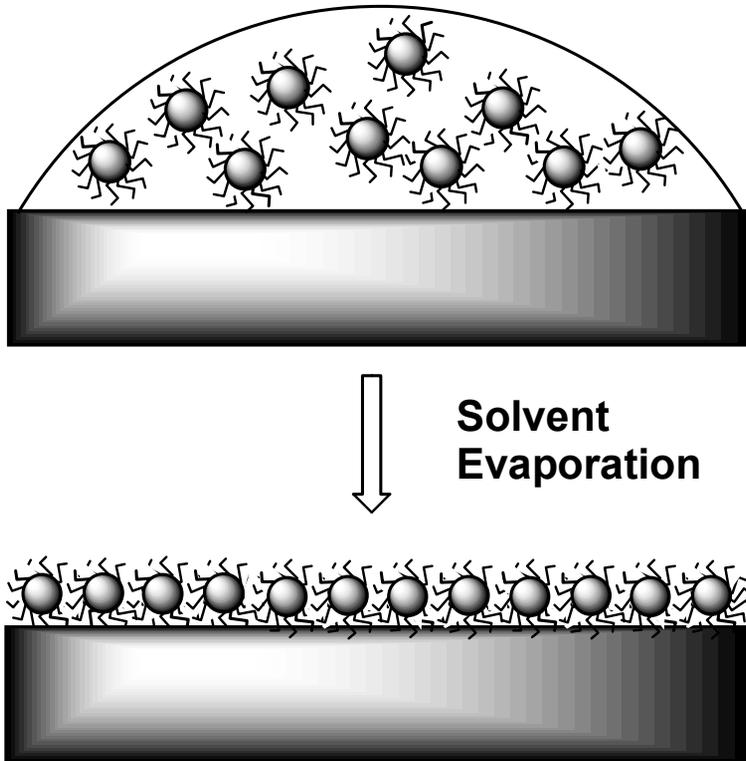
Agglomeration

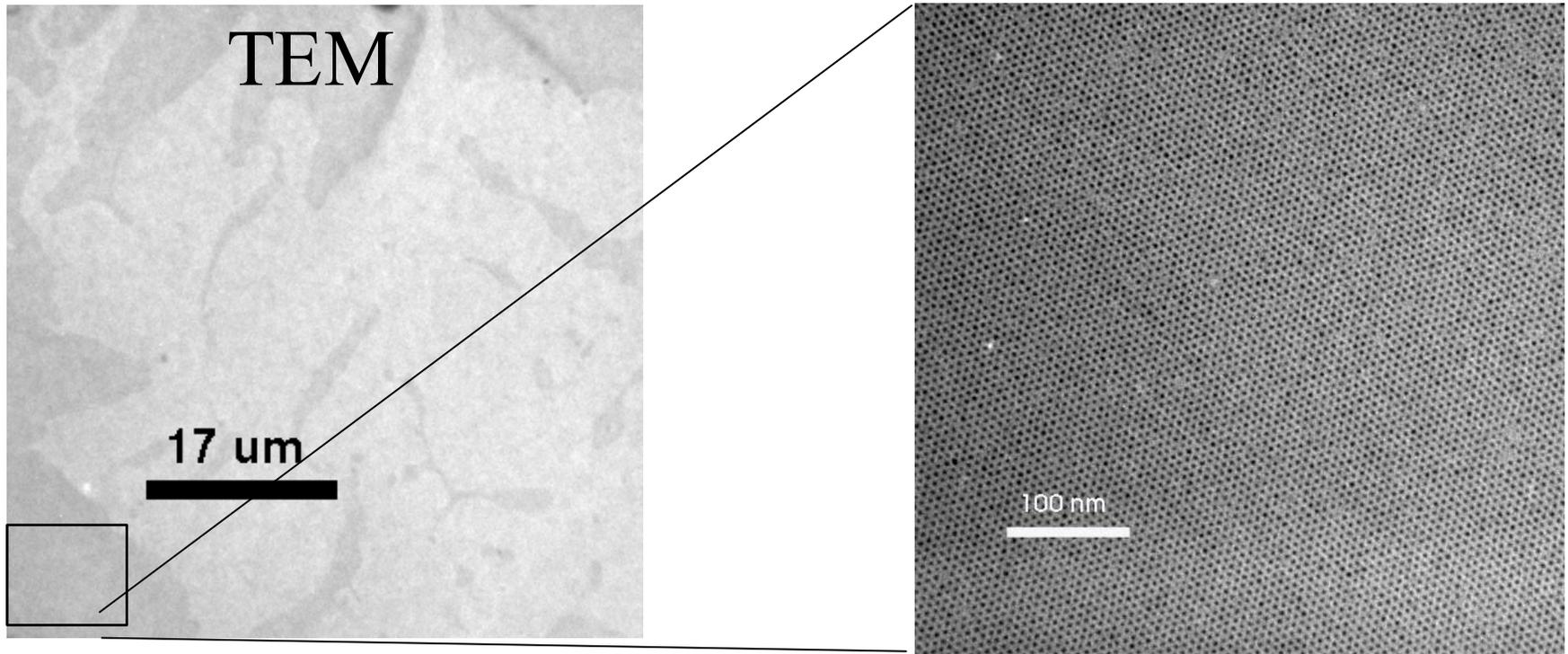


Surfactant Coating:
Steric Repulsion

S. Sun, C.B. Murray, D. Weller, L. Folks, A. Moser Science 287, 1989 (2000)

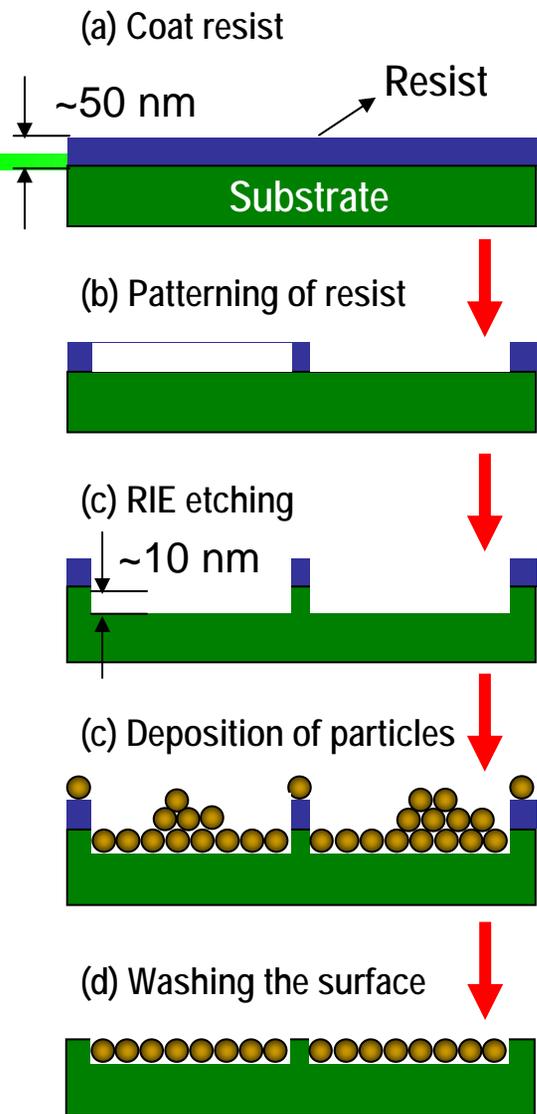
Evaporation Method



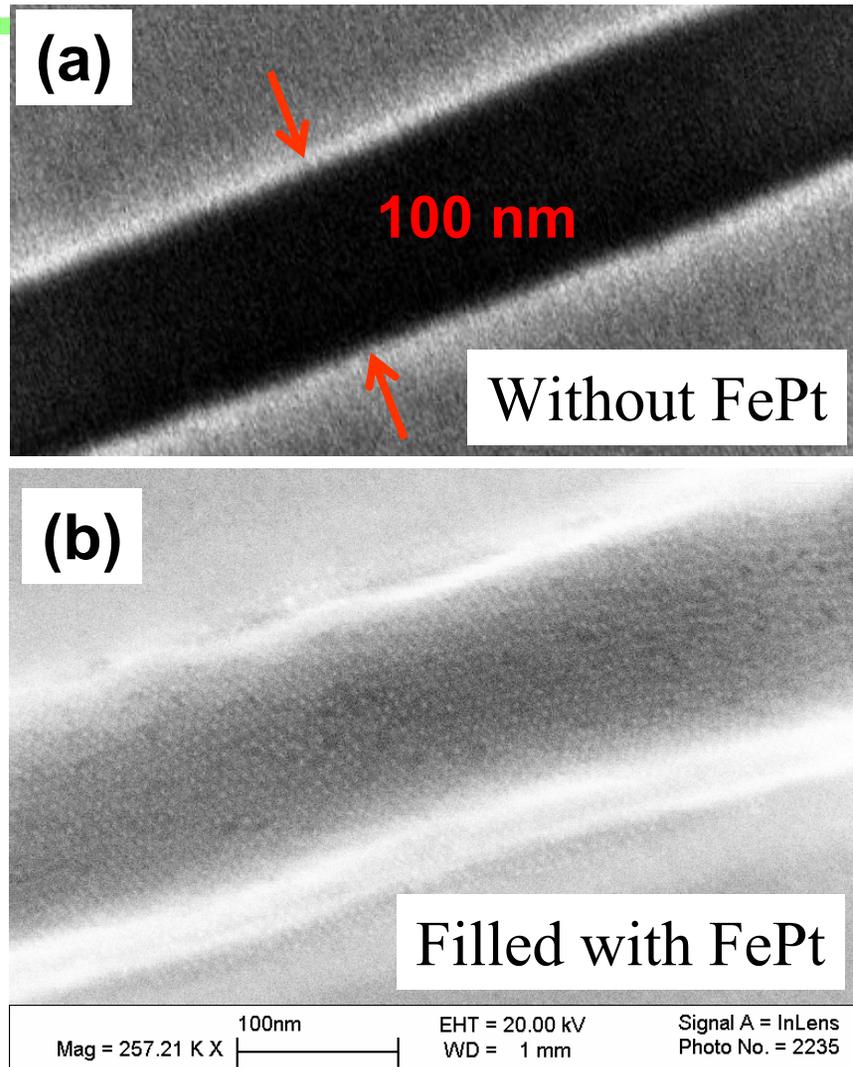


Need to extend ordering over size of disc!

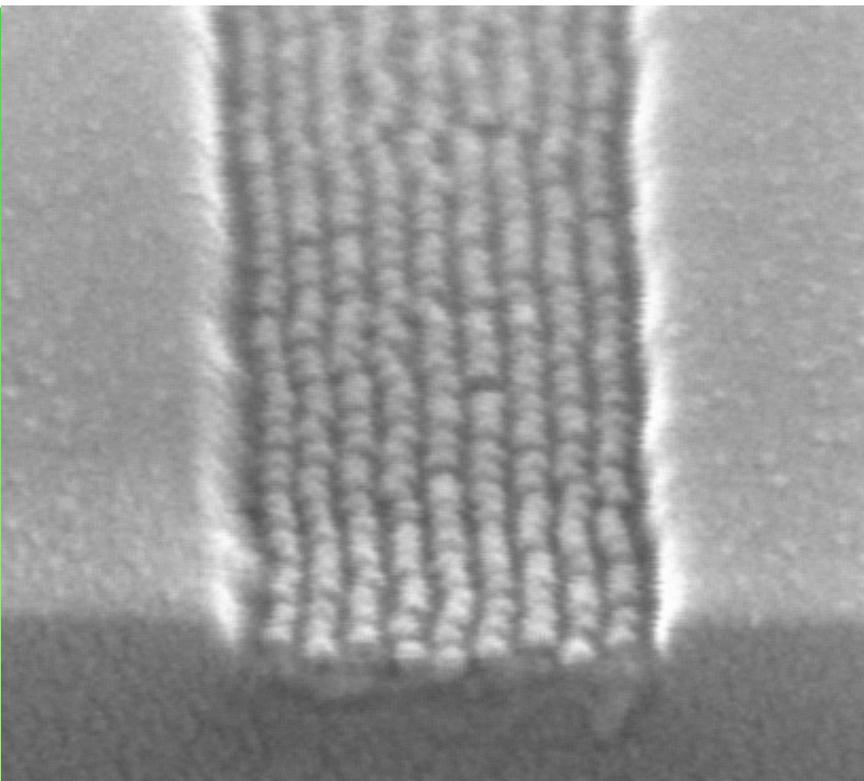
Dual Patterning Approach



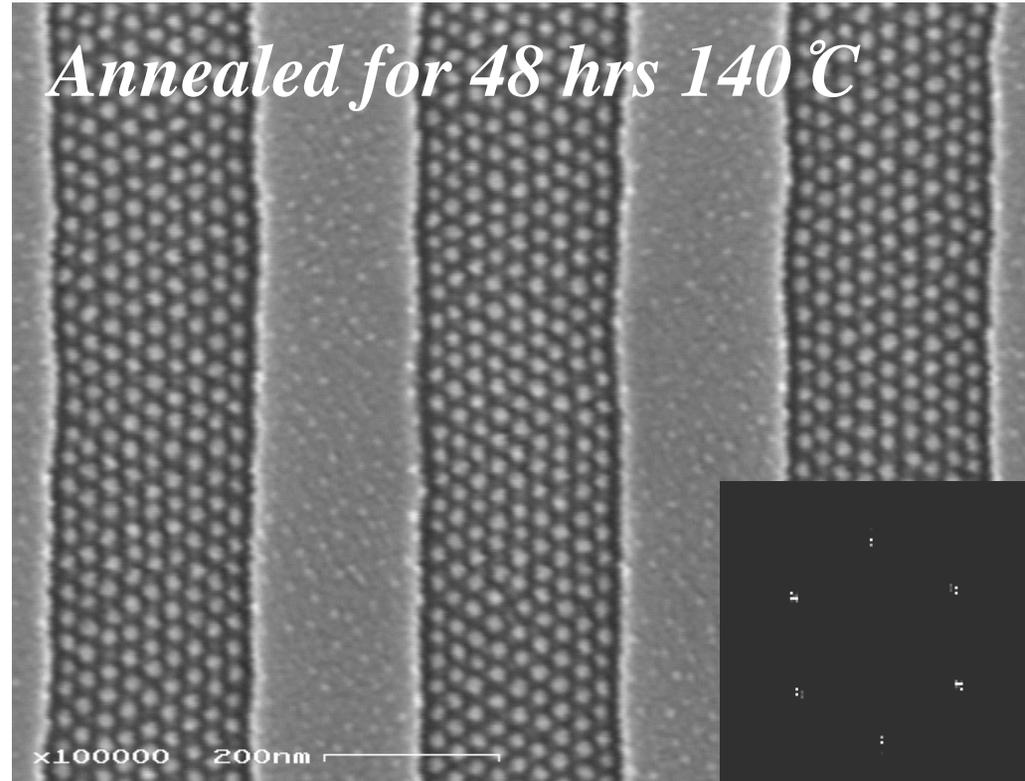
Self-assembly process



Xiaomin Yang et al. (2003)



200 nm



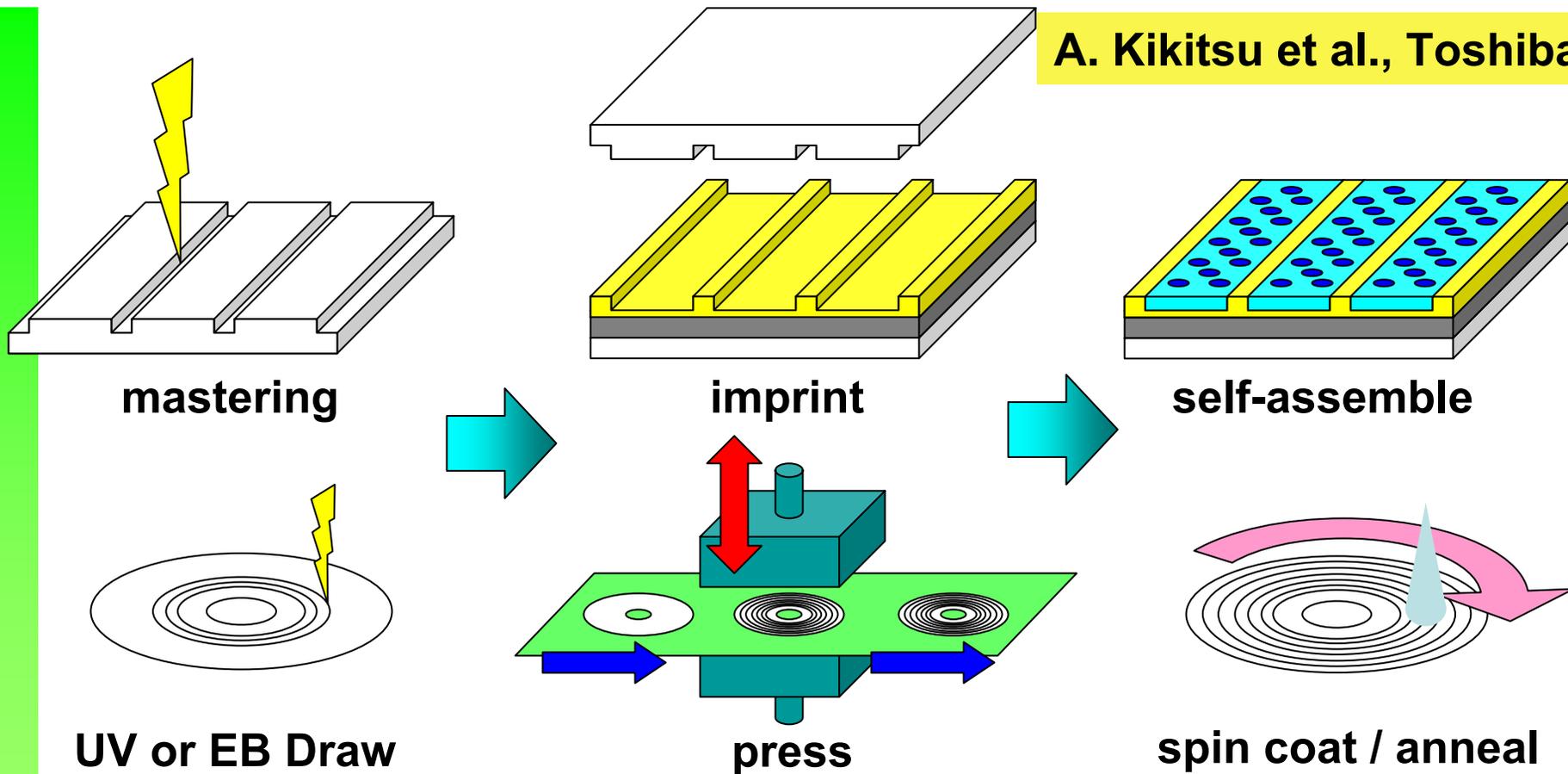
200 nm

Topographical features control the positions and ordering of block copolymer domains, which are used in top down etching process to form columnar, oriented grains. Toshiba, MIT

J.Y. Cheng, et al., "Magnetic properties of Large-Area Particle Arrays Fabricated Using Block Copolymer Lithography", IEEE Trans., 38, 2541 (2002); K. Naito, et al. "2.5 inch Disk Patterned Media Prepared by an Artificially Assisted Self-Assembling Method" IEEE Trans on Mag., 38, 1949 (2002);

Imprint and Self-assembling: mass production

A. Kikitsu et al., Toshiba

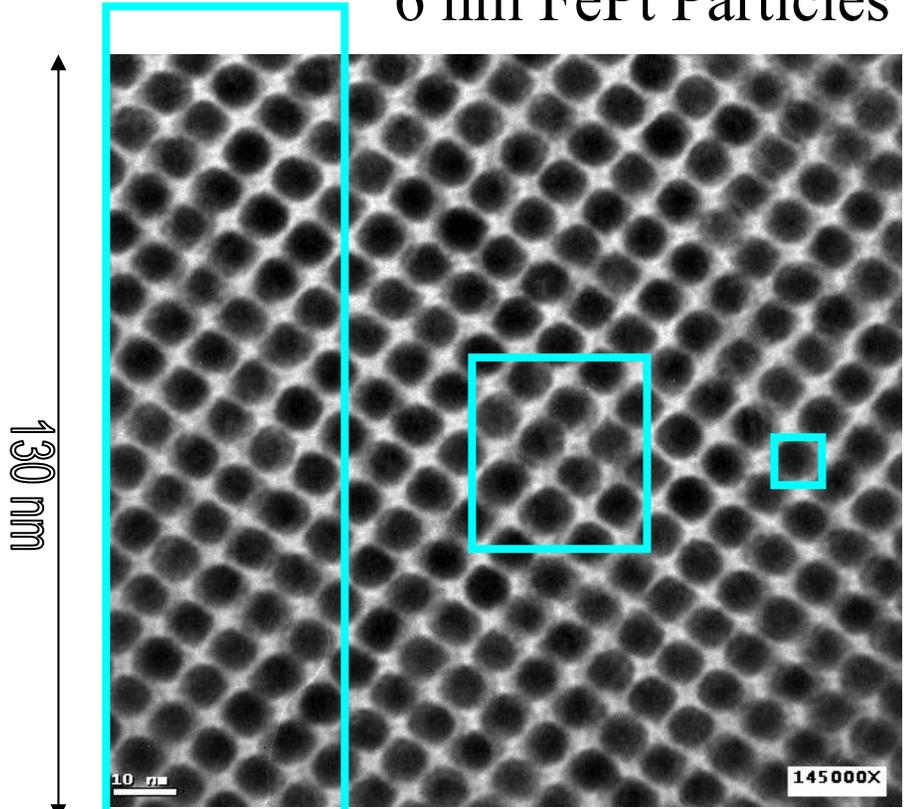


Mastering Process
; nm-scale

Disk Process; inch-scale

From Granular to Single Particle Per Bit Patterned Media

6 nm FePt Particles



Assume 6 nm Particles
in 7x7nm square array

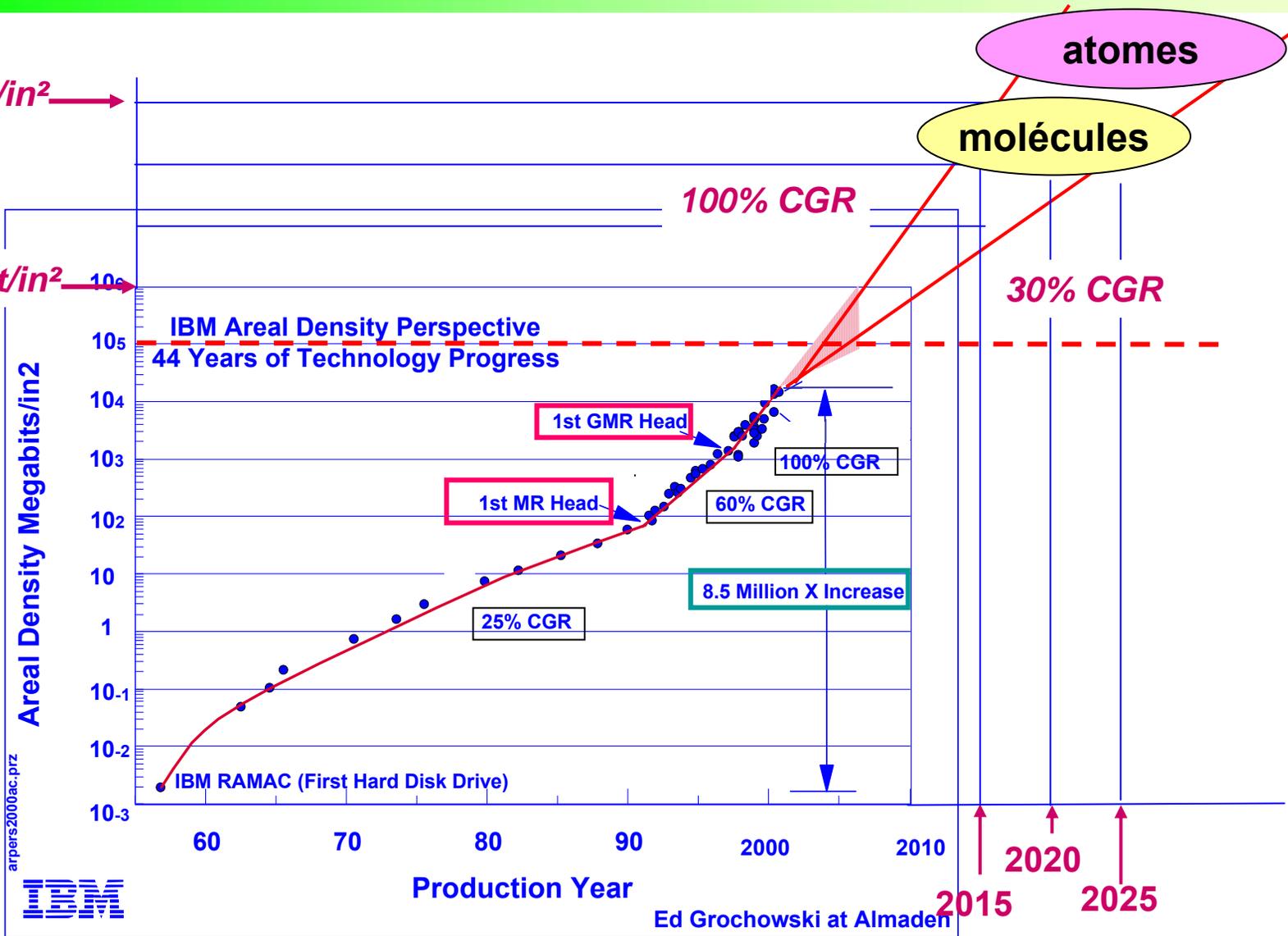
density > 10 Tbit/in² possible

- room temperature
- $t^{\max} \sim 10$ years
- $K^{\max} \sim 2 \cdot 10^8$ erg/cc

Ultimate density potential:
~3nm particles on 4x4nm :
~50 Tbit/in²

100 Gbit/in ² bit cell ~130 particles 4:1	1 Tbit/in ² bit cell ~13 particles 1:1	13 Tbit/in ² bit cell ~1 particle 1:1
---	--	---

Est-ce que ca peut continuer ?

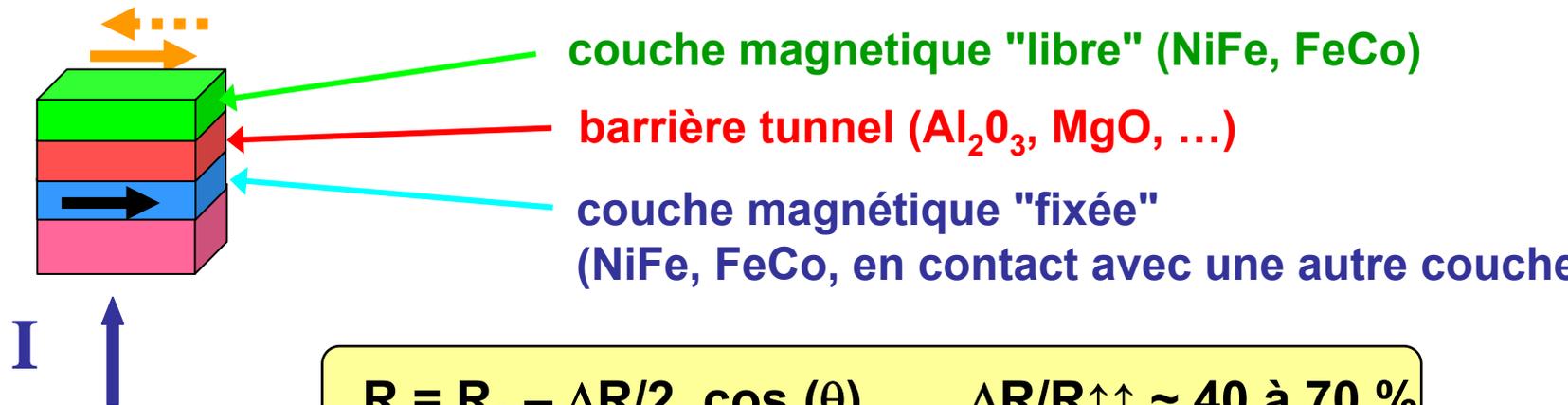


Et encore....

Le premier lien "magnétisme \leftrightarrow électronique": *le transport dépendant du spin*

1995 : la jonction tunnel magnétique

(M. Jullières, 1975,
J. Moodera, 1995)

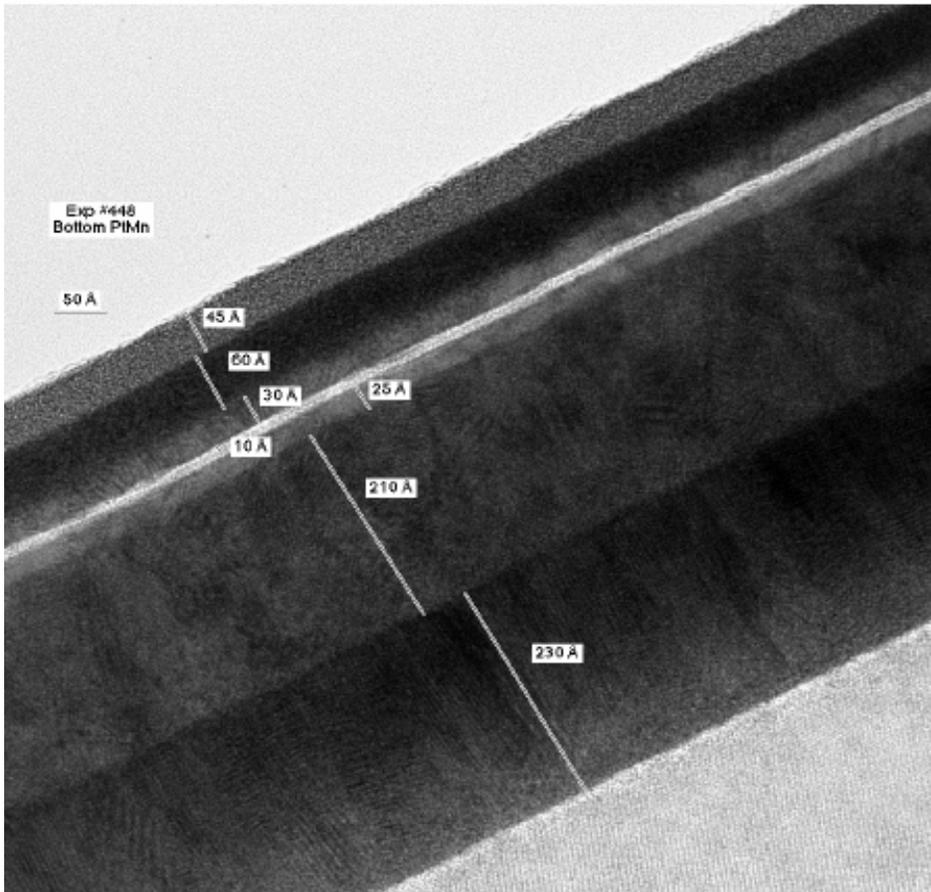


Dispositif "vertical" bien adapté à la nanoélectronique !!!

→ mémoire magnétique à accès aléatoire
Magnetic Random Access Memory (M-RAM)
(IBM > 1996)

PtMn Exchange Biased MTJ with $RA \sim 12 \Omega \mu m^2$

Ta(200Å)/PtMn(250Å)/Co₈₀Fe₂₀(15Å)/Al(6Å)+O₂/Co₈₀Fe₂₀(10Å)/Ni₈₁Fe₁₉(46Å)/Ta(100Å)



ex : barrière tunnel avec 6 Å d'Al oxydé sous p_{O₂}

$$\frac{\Delta R}{R} \approx 27\%$$

$$R.A = 13 \Omega / \mu m^2$$

*soit: 100*100 nm²
→ R = 1300 Ω*

$$R \propto \exp(k D_{AlO})$$

R doit être uniforme à mieux que qqes % sur un wafer de 300mm

enregistrement et *"ambient intelligence society"*

vers la "Société de l'Enregistrement partout" (Storage Everywhere) :

- stocker toutes les informations reçues par une personne dans toute sa vie,
- pouvoir la retrouver facilement au besoin

ex: www.microsoft.com/barc/MediaPresence/MyLifeBits.aspx
 www.clve.fr/confident.htm

Le disque de Phaistos

- civilisation Minoène, Crète daté 1700 av. JC
- Diamètre 16cm, épaisseur 2.1cm
- Double face
122 + 119 = 241 symboles
codés sur 45 caractères
différents

Φ 16 cm



More information @
<http://www.uoa.gr/~ipolig/fdisk.html>

**et le premier "traité" sur le magnétisme
date de 695 avant JC (par Guangzhong, en Chine)**

On peut toujours "lire" des livres qui ont plus de 1000 ans ...
 ... **qu'en sera-t-il de l'enregistrement digital dans 10-30 ans ??????**

standards : dépendent de données commerciales

- ... *pas de maintenance à long terme!*
- *de nouvelles générations de standards chaque année ou presque*
- *la portabilité croisée entre produits n'est pas toujours assurée*

support d'enregistrement : en dépit de test de fiabilité accéléré, *il n'y a pas de garantie que tous les mécanismes de défaut sont couverts: le seul test réel, c'est le stockage sur le long terme*

redondance :

- dans un livre, quelques caractères effacés n'empêche pas la compréhension.
- *les données codées en binaire et compressées sont beaucoup plus fragiles !*

On peut toujours "lire" des livres qui ont plus de 1000 ans ...

... qu'en sera-t-il de l'enregistrement digital dans 10-30 ans ??????

standards : dépendent de normes commerciales

- ... pas de maintenance à long terme!
- de nouvelles générations de standards chaque année ou presque
- la portabilité croisée entre produits n'est pas toujours assurée

support d'enregistrement : en dépit d'un test de fiabilité accéléré, *il n'y a pas de garantie que tous les mécanismes de défaut sont couverts: le seul test réel, c'est le stockage sur le long terme*

redondance :

- dans un livre, quelques caractères effacés n'empêche pas la compréhension.
- les données codées en binaire et compressées sont beaucoup plus fragiles !