

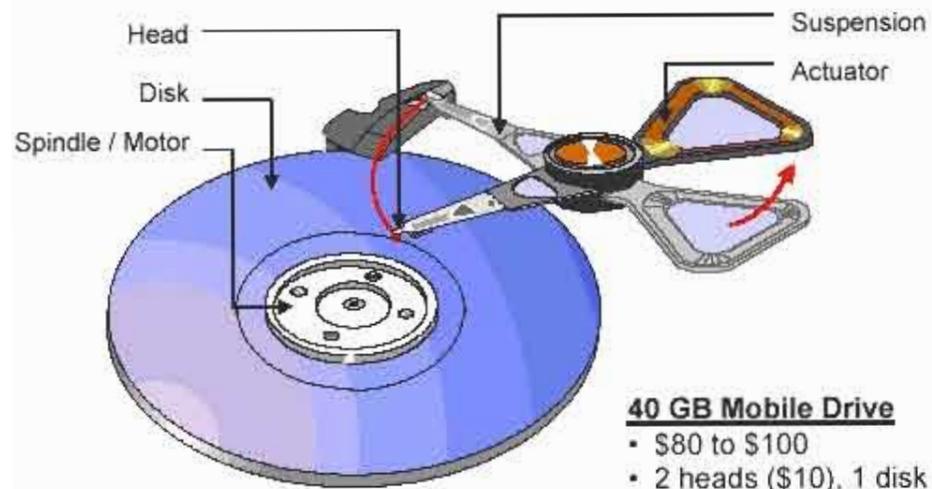
11 mai 2005, Colloque du Centre d'Alembert

*Recherche fondamentale et applications:
des racines de la spintronique à son
arrivée dans nos ordinateurs*

Albert Fert

Université PARIS-SUD et
Unité Mixte de Physique CNRS/THALES

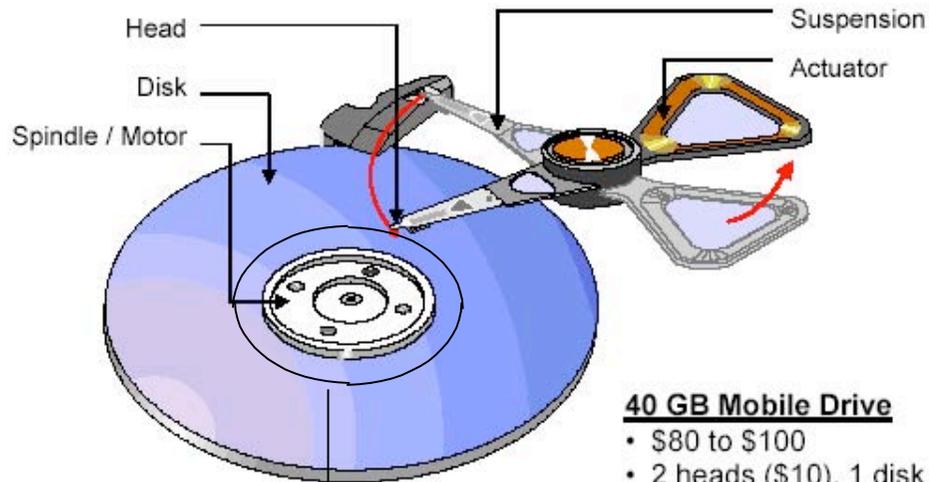
The Magnetic Recording System



40 GB Mobile Drive

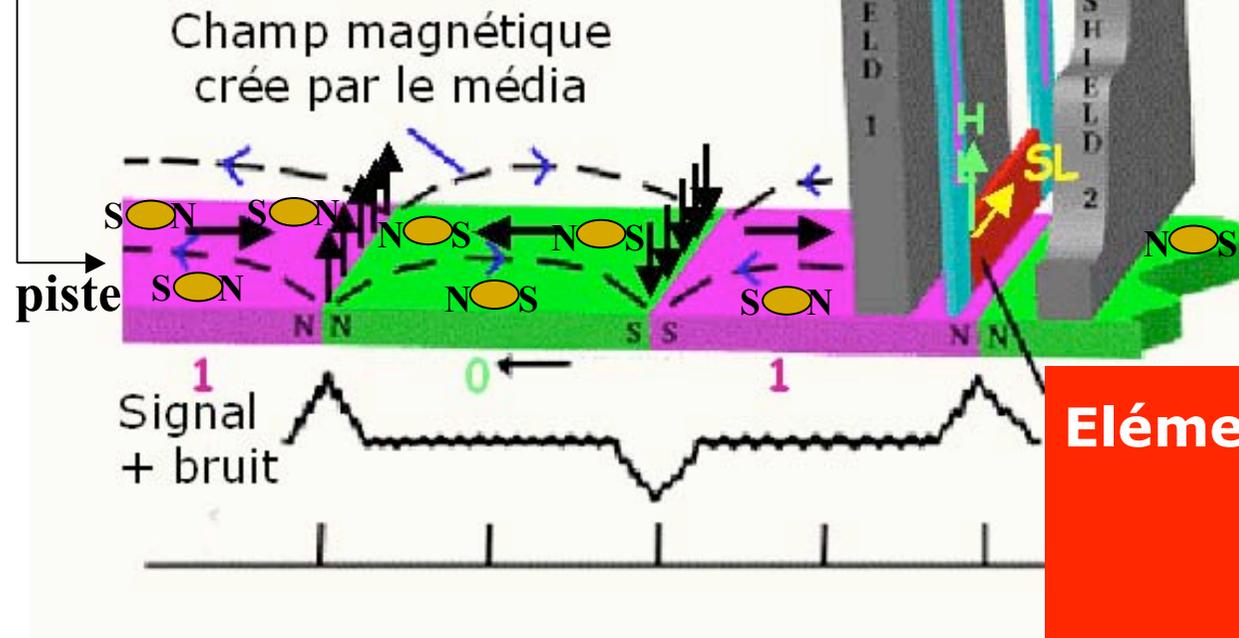
- \$80 to \$100
- 2 heads (\$10), 1 disk (\$5)
- 40 Gbit/in² to 80 Gbit/in²

The Magnetic Recording System



**Tête de lecture
de disque dur**

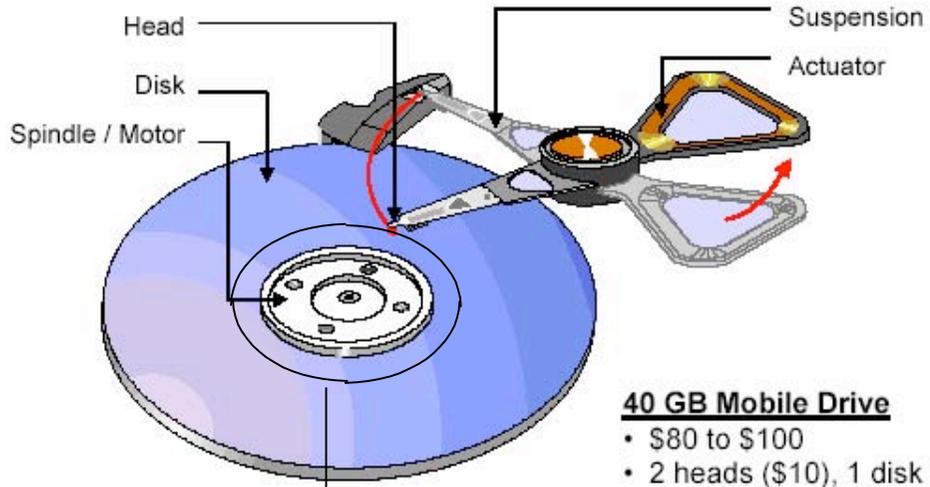
- 40 GB Mobile Drive**
- \$80 to \$100
 - 2 heads (\$10), 1 disk (\$5)
 - 40 Gbit/in² to 80 Gbit/in²



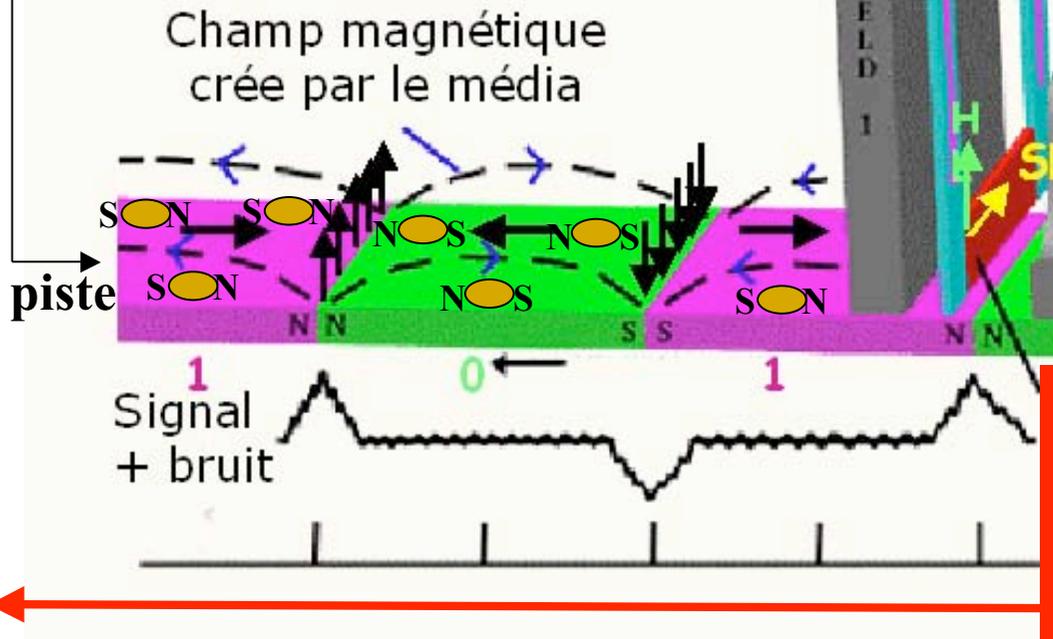
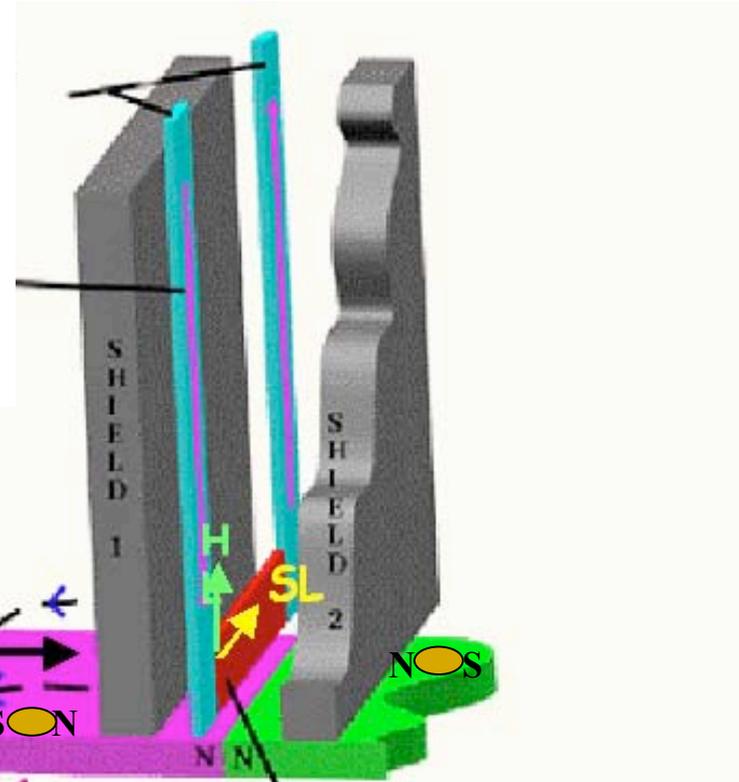
Élément GMR

The Magnetic Recording System

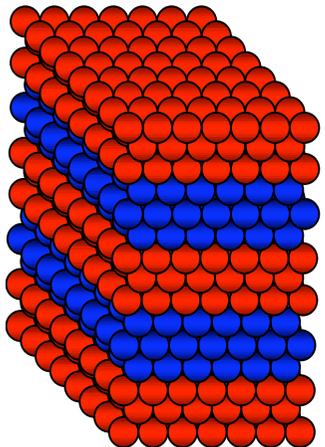
**Tête de lecture
de disque dur**



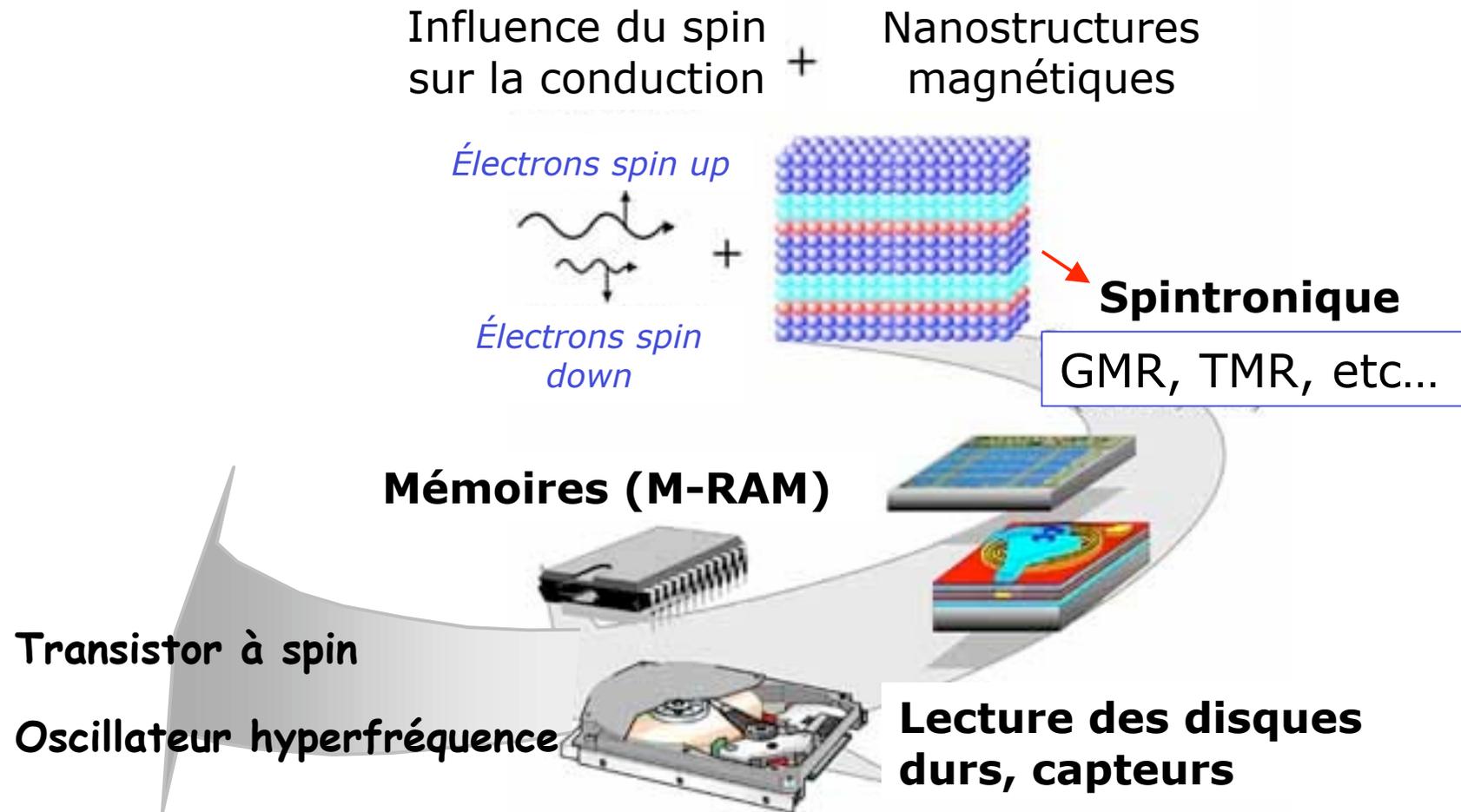
- 40 GB Mobile Drive**
- \$80 to \$100
 - 2 heads (\$10), 1 disk (\$5)
 - 40 Gbit/in² to 80 Gbit/in²



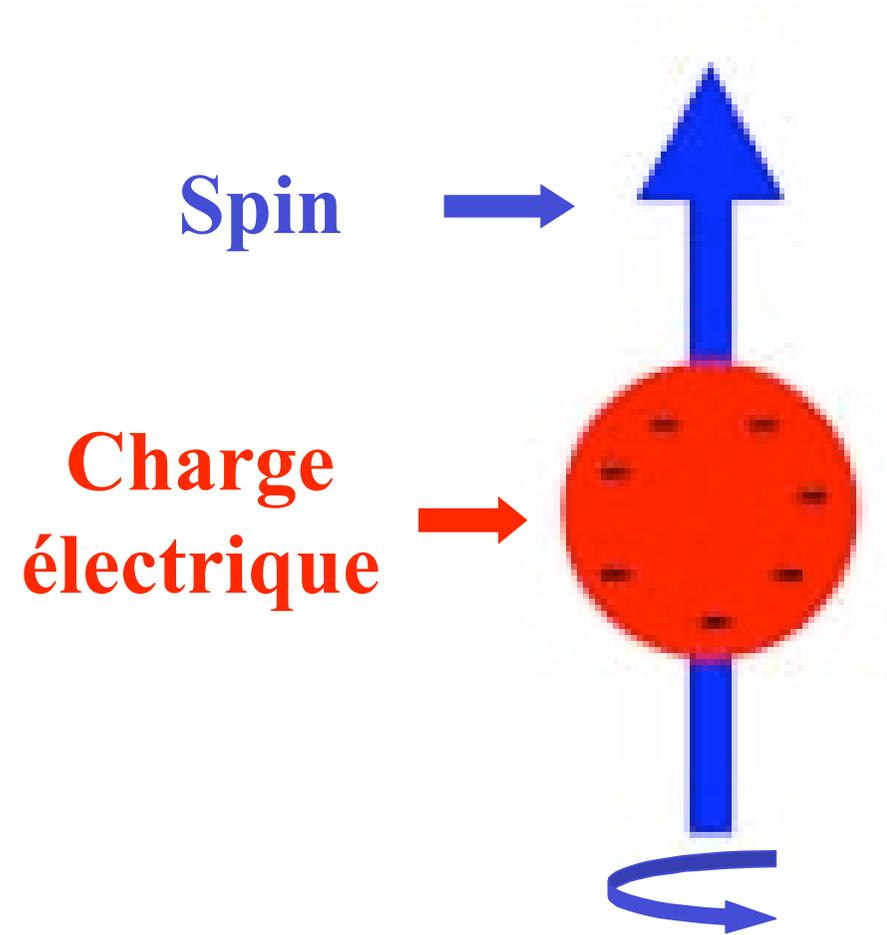
**Élément GMR
(multicouche
magnétique)**



- **des racines de la spintronique à son arrivée dans nos ordinateurs**



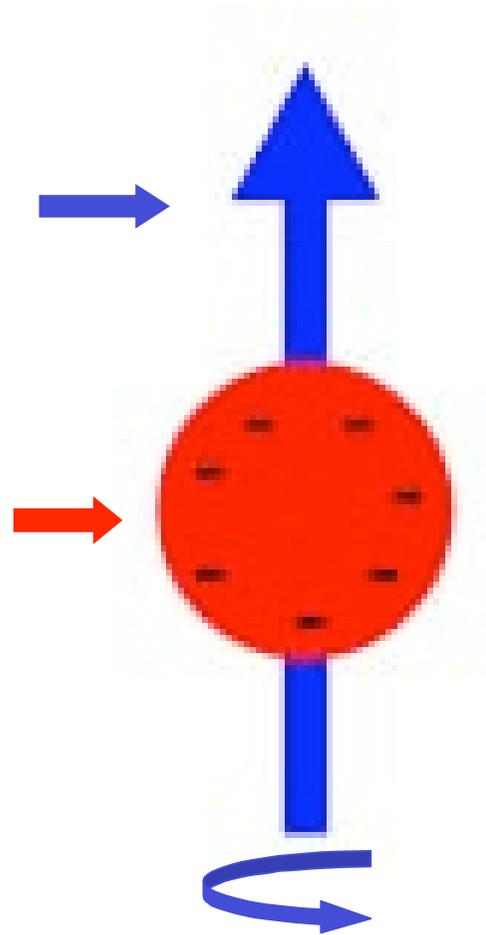
Electron



Electron

Spin

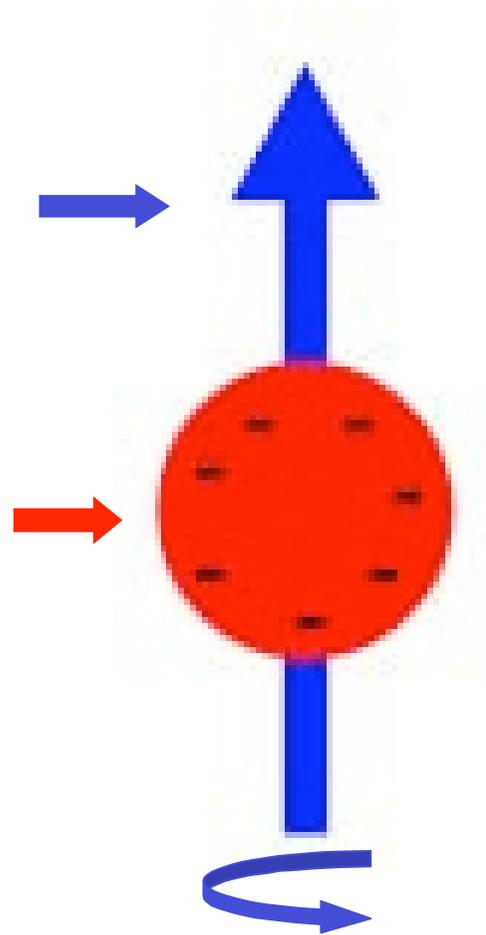
**Electronique:
électrons mis en
mouvement
(courant) par action
sur la charge**



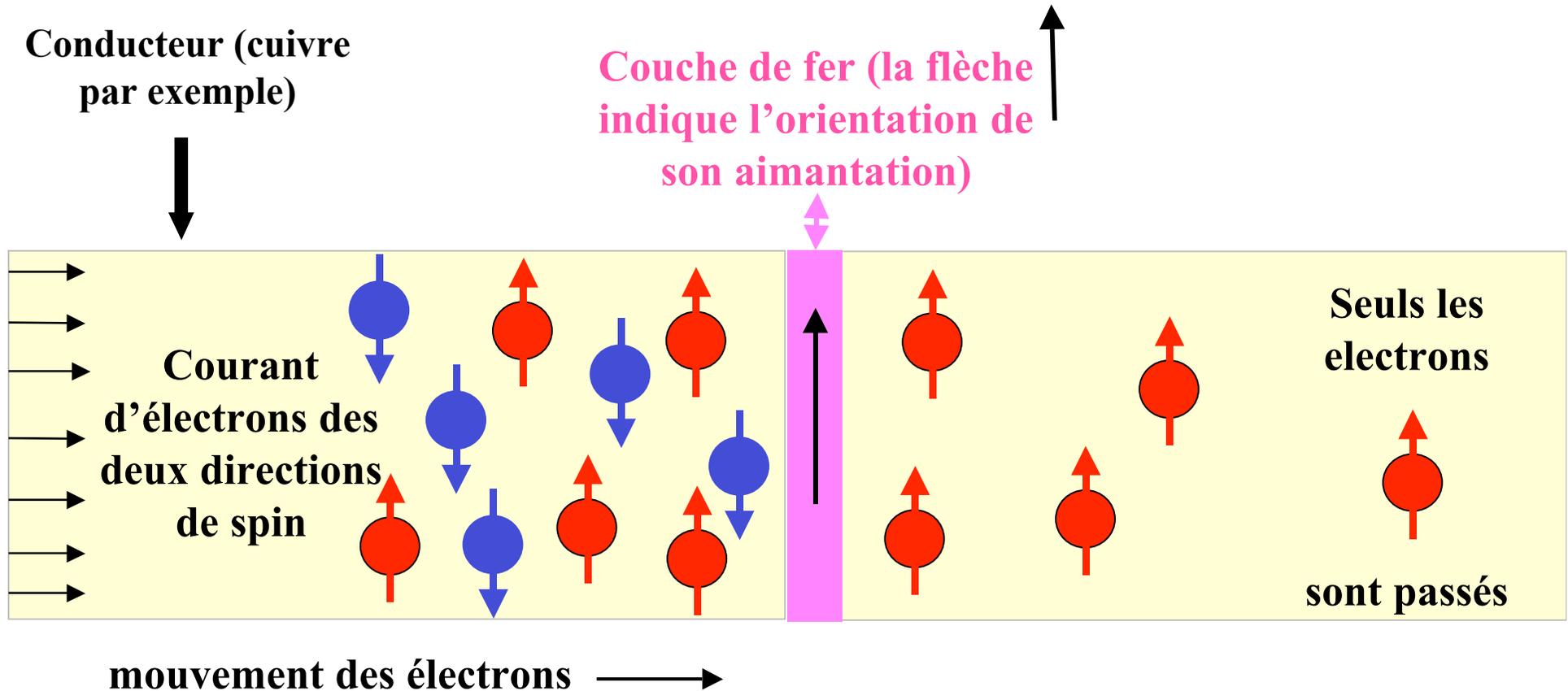
Electron

**Spintronique:
mouvement
par action sur
le spin**

**Charge
électrique**

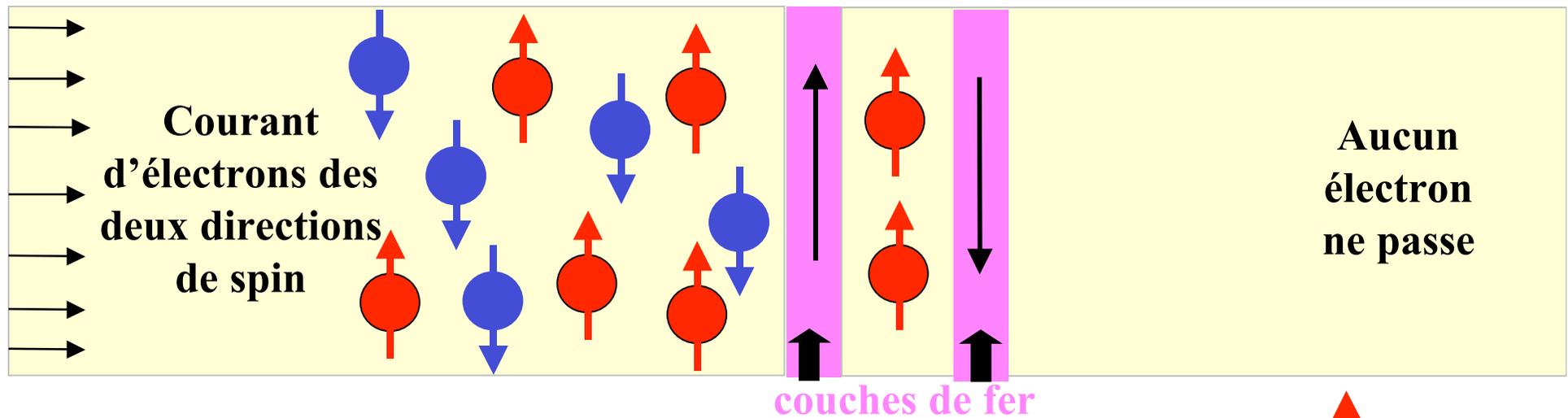


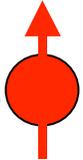
Principe de la spintronique: placer sur le trajet des électrons une très fine couche de matériau aimanté (du fer par exemple) pour arrêter (ou ralentir) les électrons d'une certaine orientation de spin

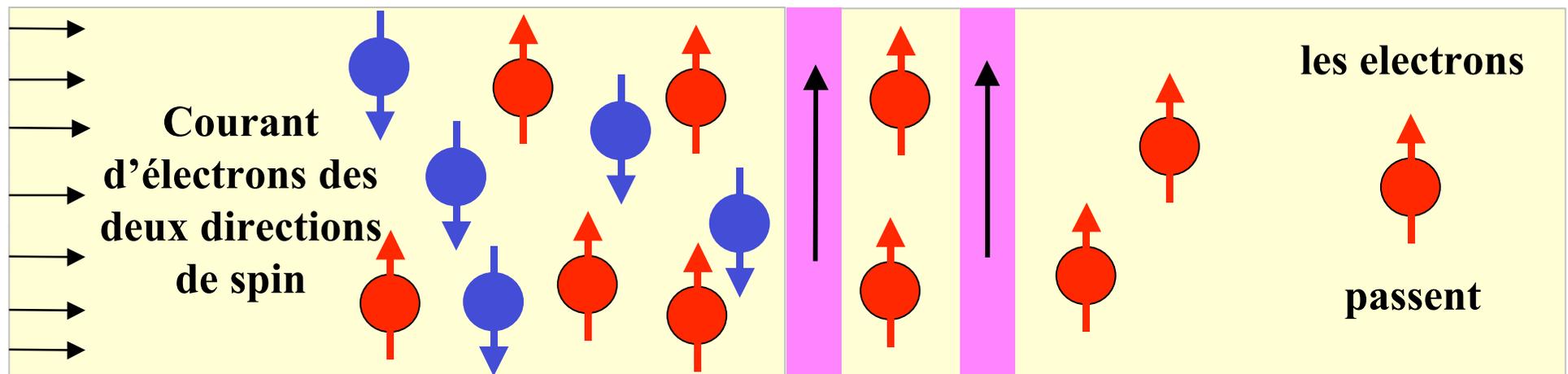


Concept de la MagnetoRésistance Géante (GMR)

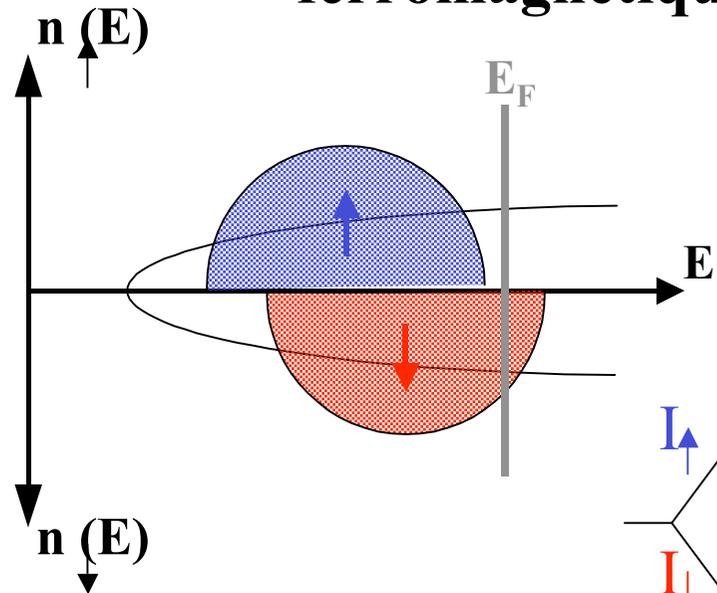
1) Aimantations des couches de fer opposées: aucun électron ne passe dans le conducteur (courant nul, en réalité très peu)



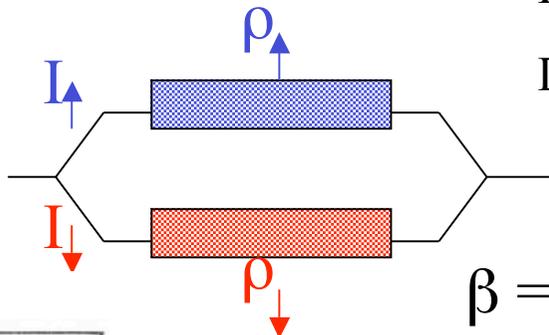
2) Un champ magnétique aligne les aimantations: les spins  passent



Influence du spin sur la mobilité des électrons dans les métaux ferromagnétiques (modèle à 2 courants)

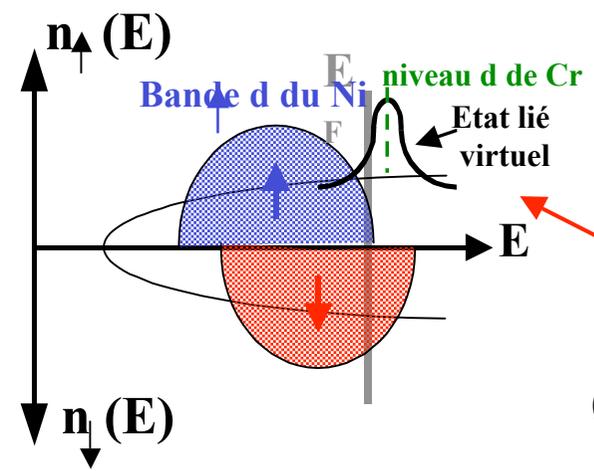
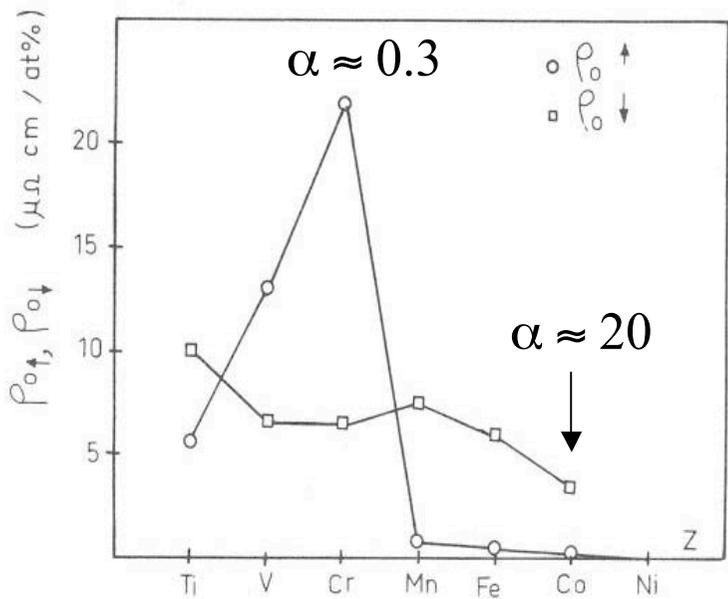


Mott, Adv.Phys.13, 325, 1964
 Fert et al, PRL 21, 1190, 1968
 Loegel-Gautier, JPCS 32, 1971
 Fert et al, J.Phys.F6, 849, 1976
 Dorlejin et al, ibid F7, 23, 1977

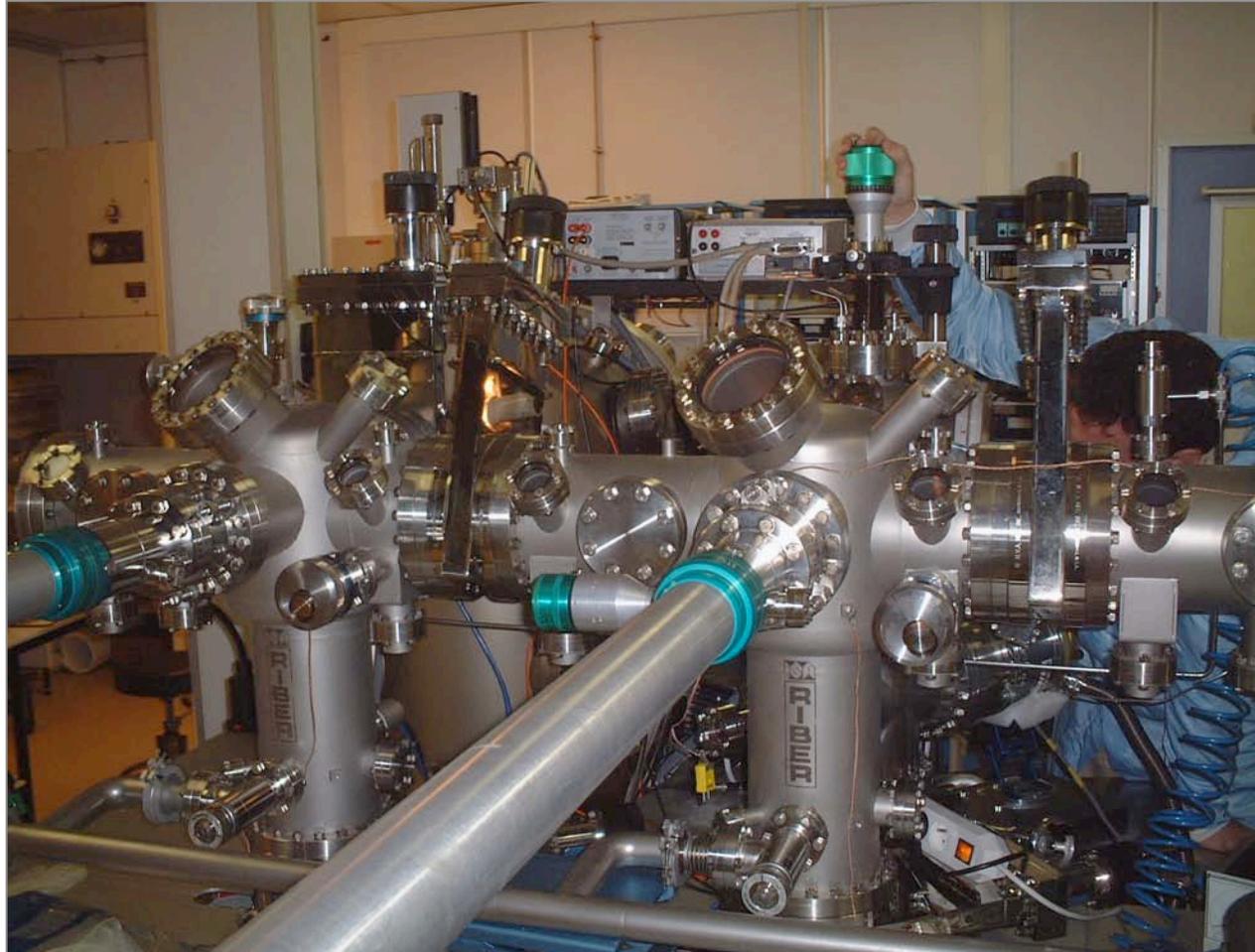


$$\alpha = \rho_{\downarrow} / \rho_{\uparrow} \text{ or}$$

$$\beta = (\rho_{\downarrow} - \rho_{\uparrow}) / (\rho_{\downarrow} + \rho_{\uparrow}) = (\alpha - 1) / (\alpha + 1)$$

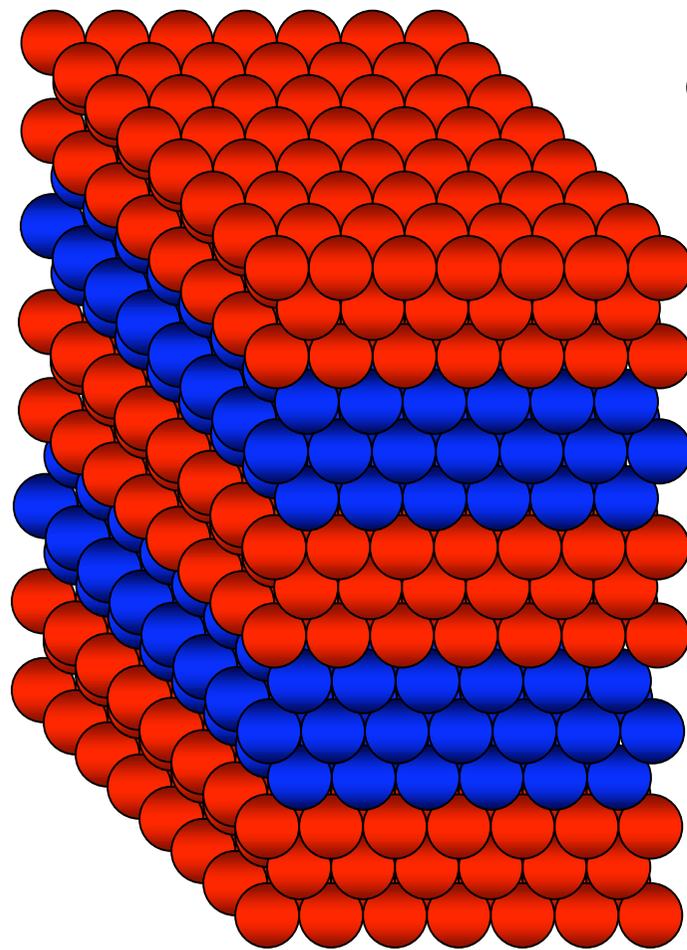


Modèles de structure électronique (Orsay, école « Friedel »)



Bâti d'Épitaxie par Jets Moléculaires permettant la croissance de multicouches métalliques (cliché CNRS/Thales)

- **Multicouches magnétiques**



Aimantations des
couches de fer en l'absence
de champ magnétique

Cr

Fe

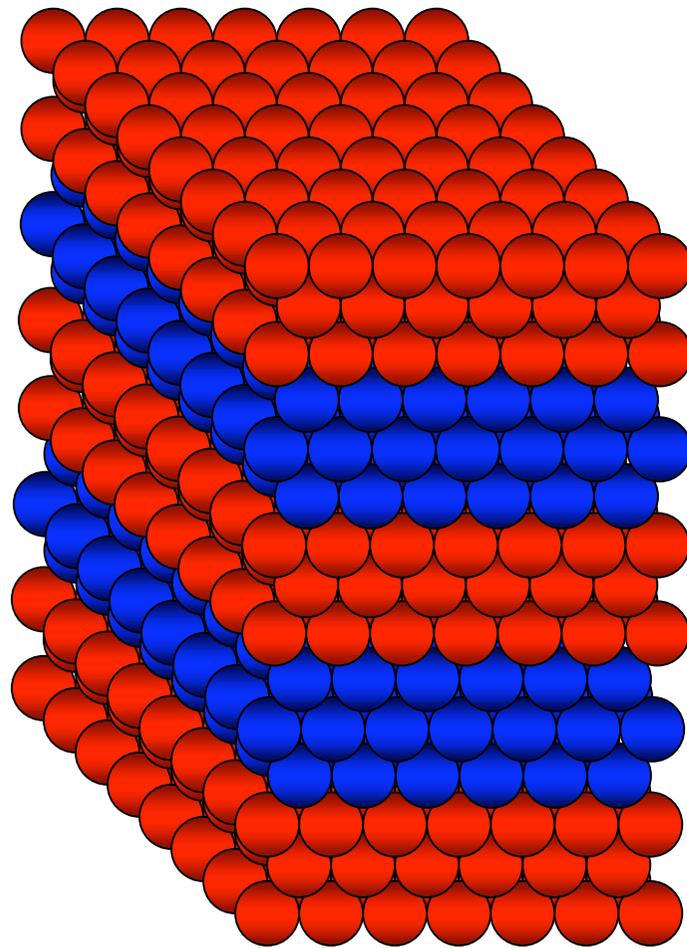
Cr

Fe

Cr



- **Multicouches magnétiques**



Un champ magnétique  aligne les aimantations des couches de fer et ouvre la porte au courant

Cr

Fe 

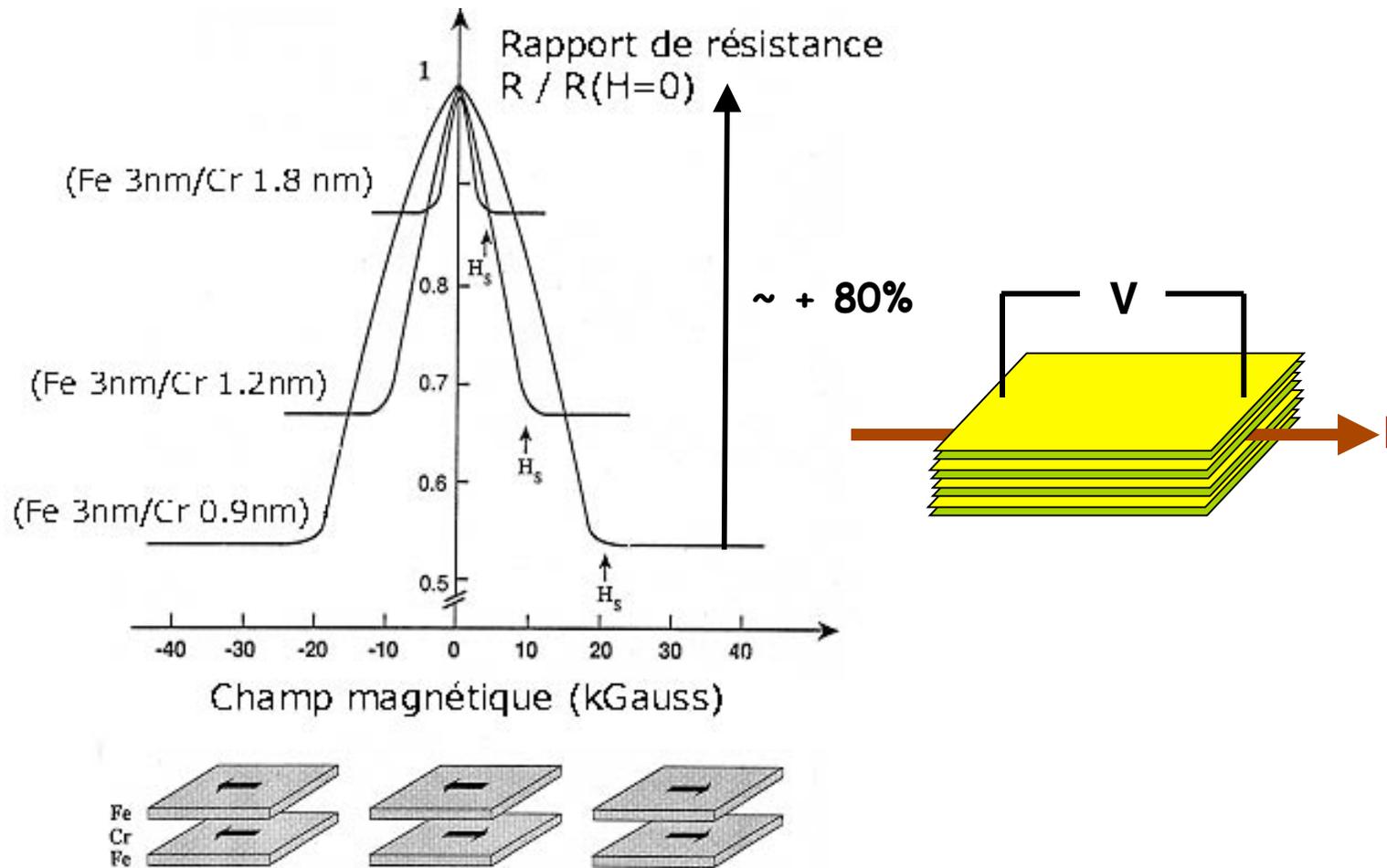
Cr

Fe 

Cr

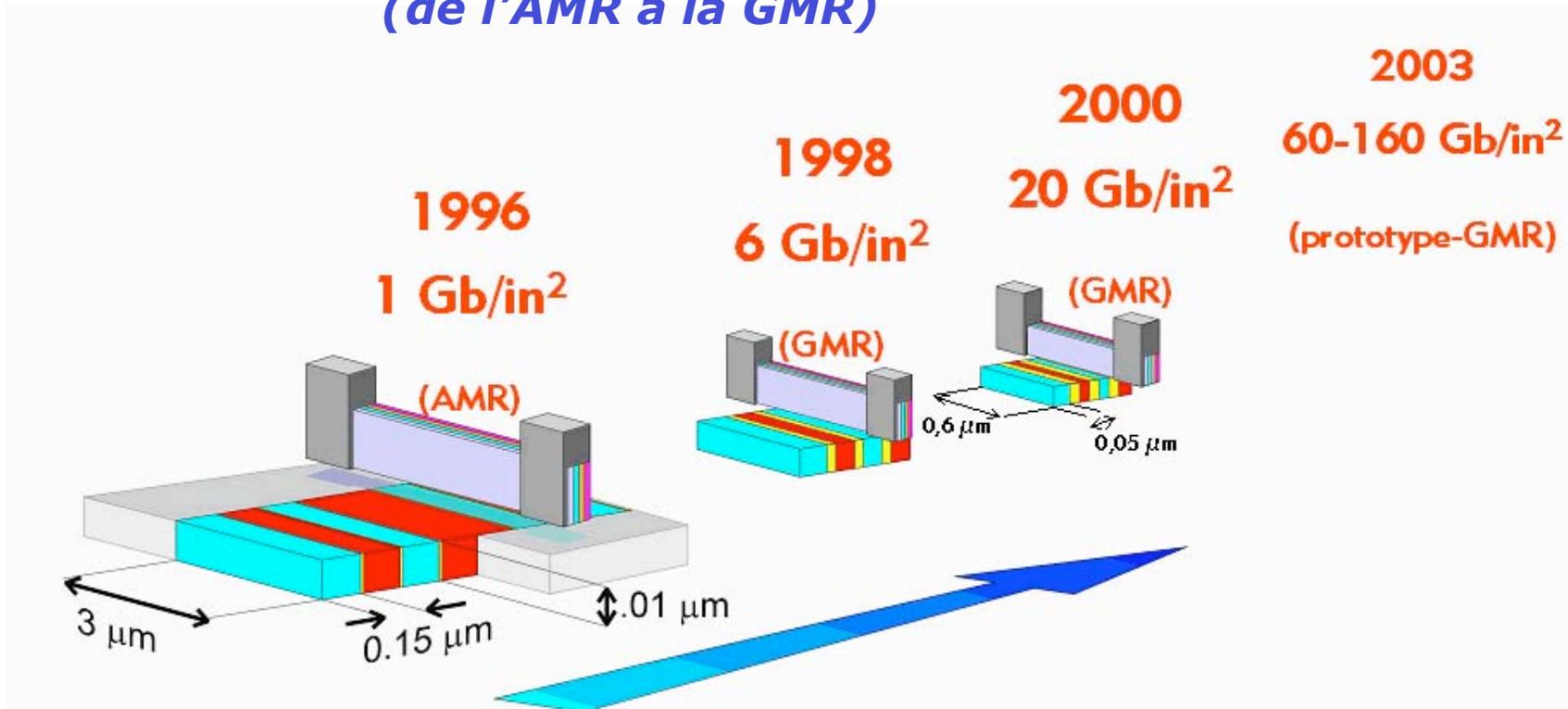
- **Magnétorésistance géante (GMR)**

LPS-Orsay, collaboration avec Thomson-CSF, 1988, système Fe/Cr



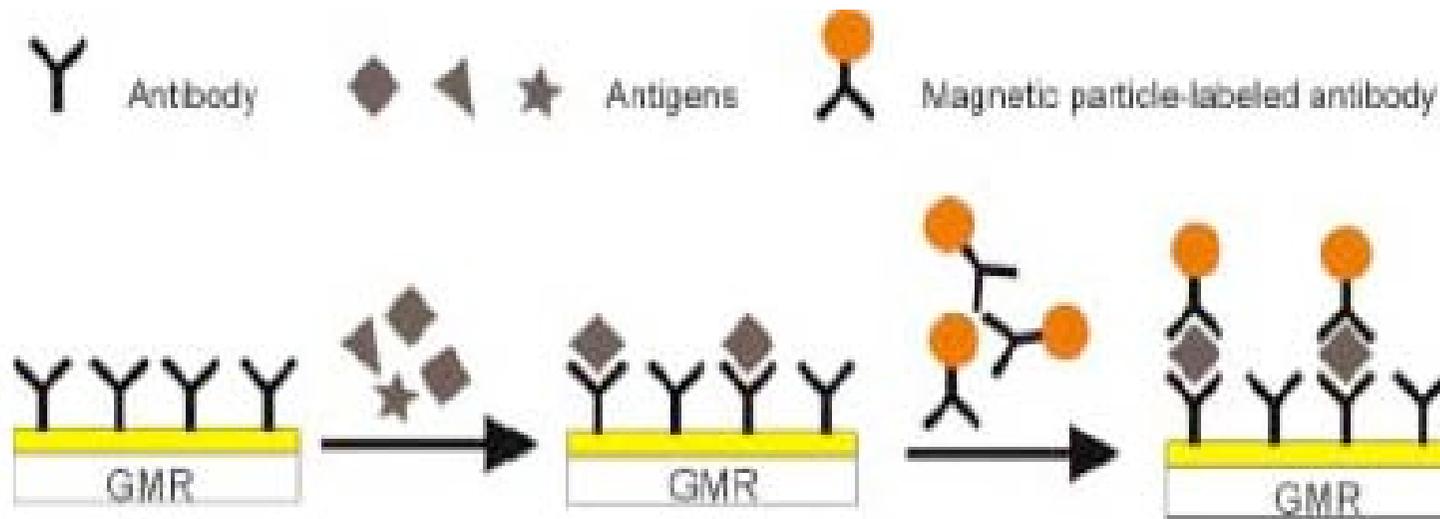
- **Enregistrement magnétique:**

- *évolution des densités surfaciques
(de l'AMR à la GMR)*



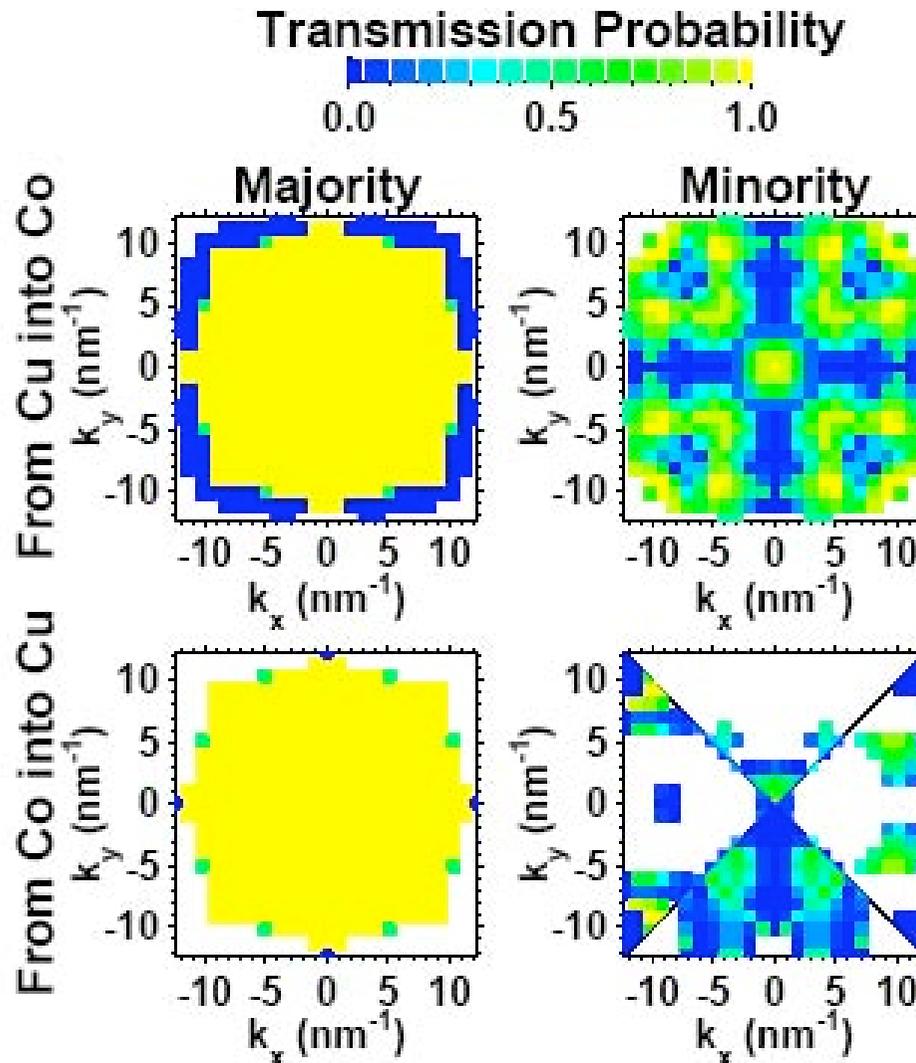
1 disque dur de 400 Giga-octet peut contenir une information équivalente
à environ **800.000 livres** (format livre de poche)
ou à **1 million de photographies** (de définition moyenne)
ou à **8000 CD audio** (compression MP3)
ou à **300 heures video**, ou **36 heures video haute def.**

Analyse biologique « biochips »



↔
quelques microns
(prototypes avec
réseaux de capteurs
pour détecter un
millier de cibles
différentes)

Théorie de la GMR, exemple: calcul de la probabilité de transmission des électrons de spin « majoritaire » et « minoritaire » à un interface de multicouche Cobalt/Cuivre (« ingénierie de spin »)

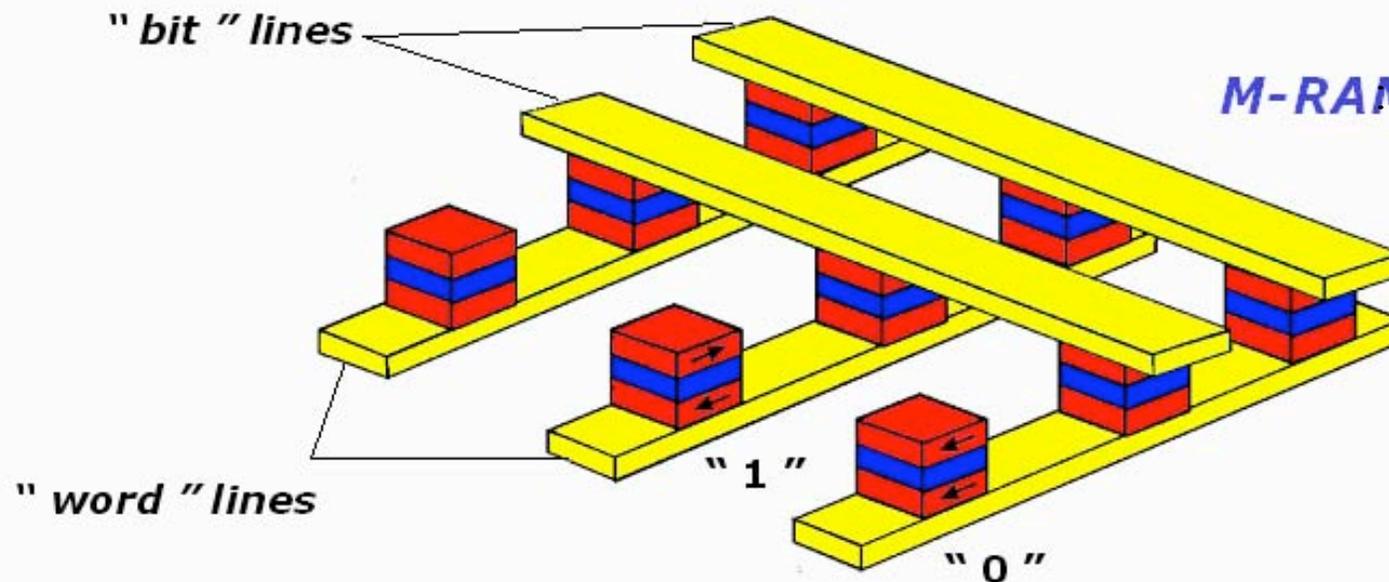
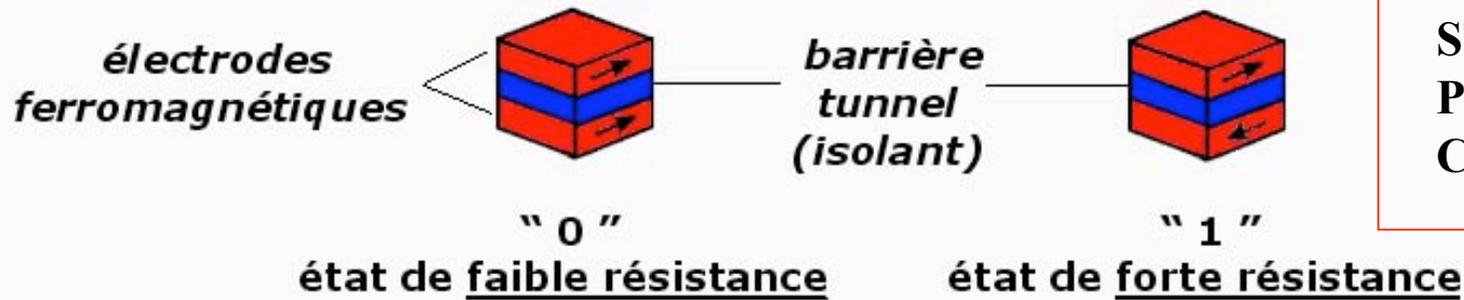


Stiles et al

- Magnéto-résistance tunnel (TMR) et mémoires magnétiques MRAM

Technologie
MRAM en Europe

Altis (Infineon-IBM),
ST Microelectronics,
Philips, Freescale,
Crocus, Spintron, etc



Quelques développements actuels en TMR

€ nouveaux matériaux à conduction 100% polarisée de spin (demi-metalliques)

exemples: $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ (TMR=1800%, Orsay), $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ (Orsay)
(LSMO)

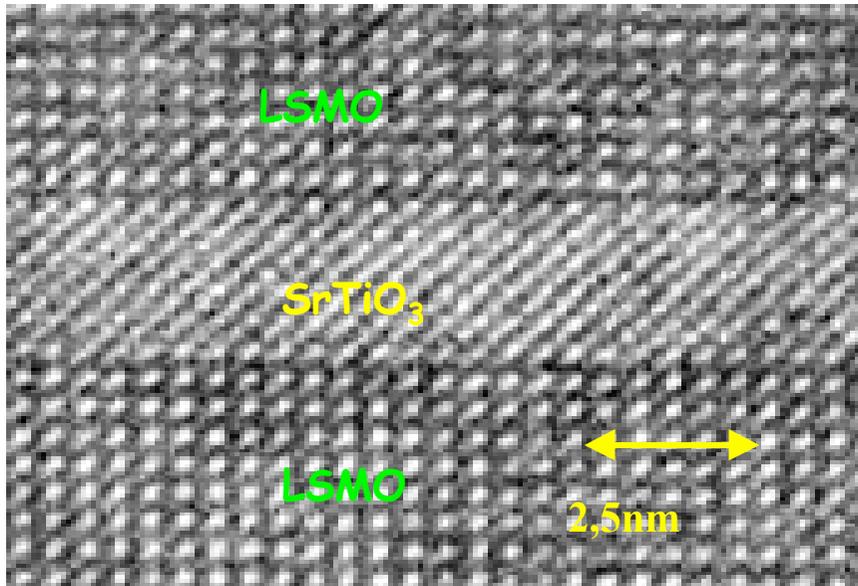
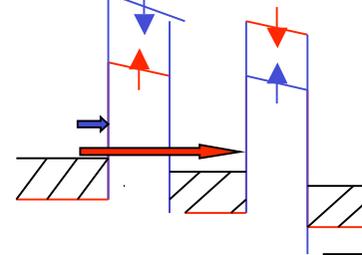
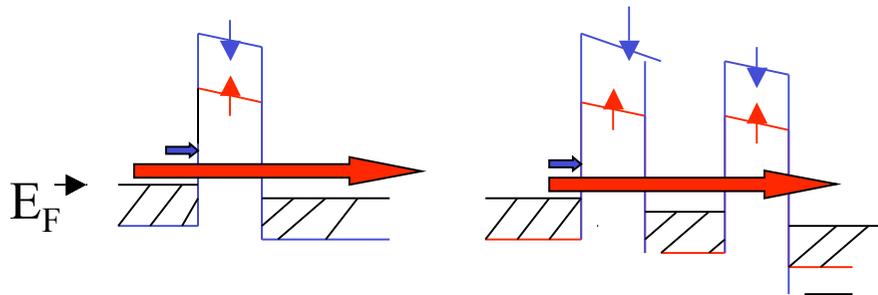
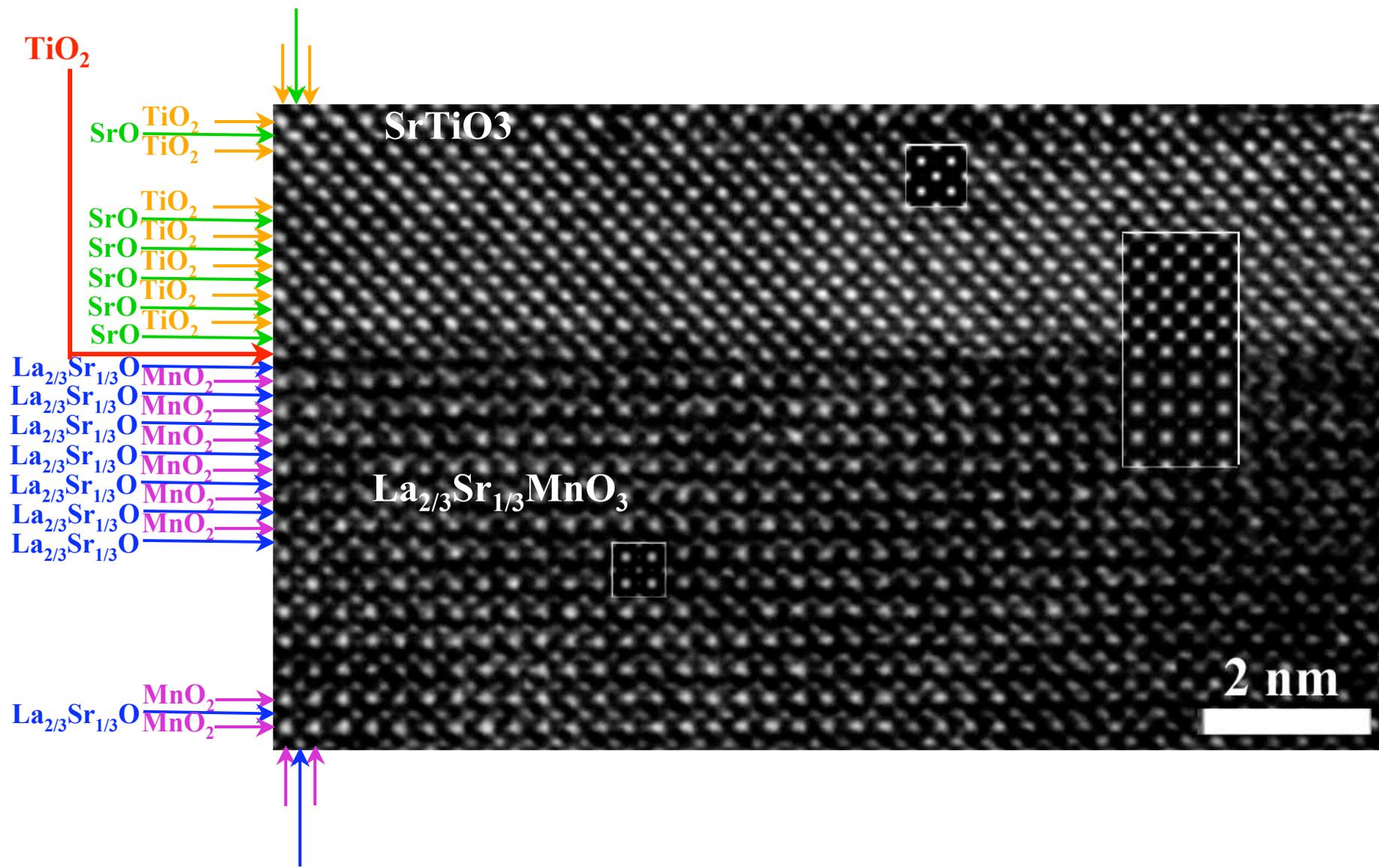


Image en coupe d'une jonction tunnel
LSMO/SrTiO₃/LSO par microscopie
électronique haute résolution
(L. Maurice, UMR CNRS/Thales)

€ nouveau concept: filtrage de spin par effet tunnel à travers isolant magnétique



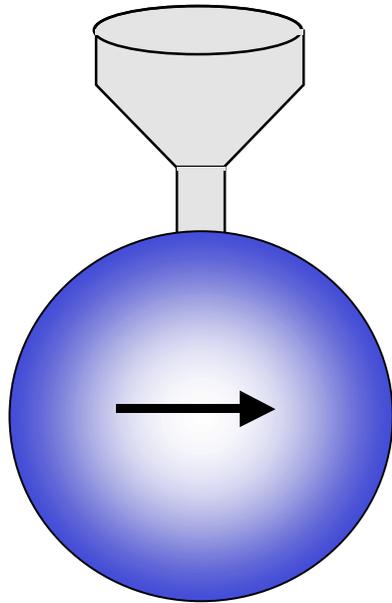
EuS, $T_c=16\text{K}$, Eindhoven
 BiMnO_3 , $T_c=105\text{K}$,
Orsay + Barcelone



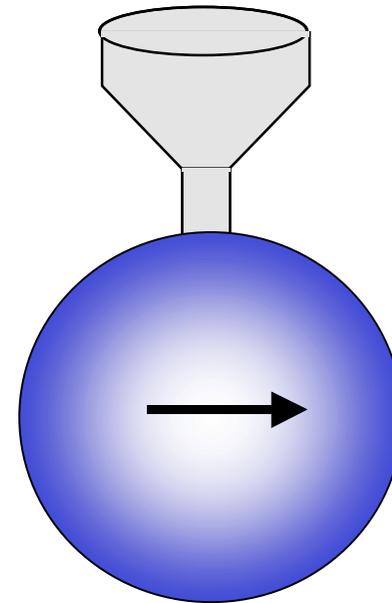
Directions actuelles et perspectives en spintronique

- 1) Manipulation d'une aimantation par transfert de spins amenés par un courant
 - Commutation purement électronique de composants spintroniques (MRAM,etc)
 - Génération d'oscillations hyperfréquence (micro-ondes)
- 2) Fusion entre spintronique et électronique traditionnelle (spintronique avec semiconducteurs)

**Manipulation d'une aimantation
par transfert de spins amenés par
un courant**

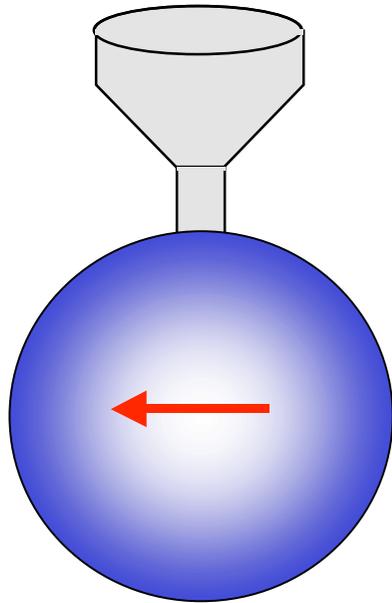


Commutation
d'aimantation

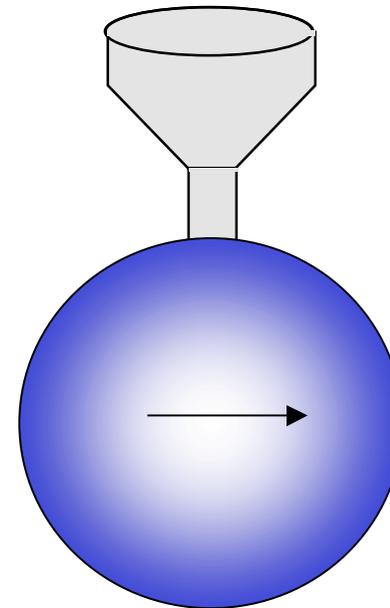


Génération d'oscillations
hyperfréquences

**Manipulation d'une aimantation par
transfert de spins amenés par un
courant**

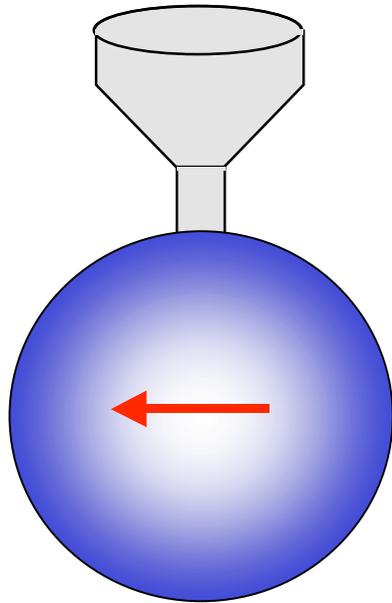


Commutation
d'aimantation

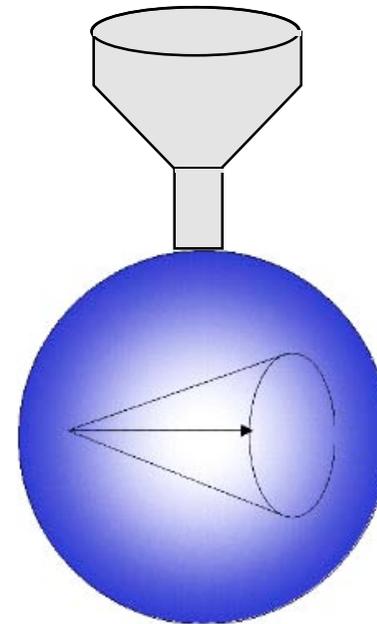


Génération d'oscillations
hyperfréquences

**Manipulation d'une aimantation par
transfert de spins amenés par un
courant**



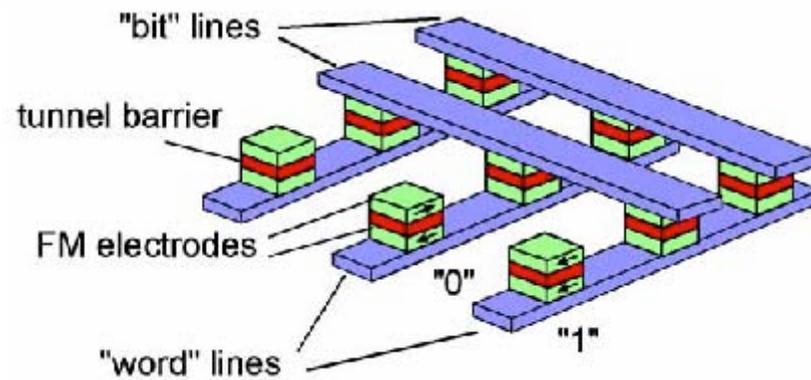
Commutation
d'aimantation



Génération d'oscillations
hyperfréquences

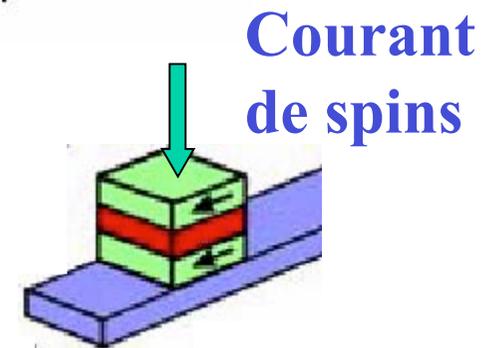
Application du transfert de spin: commutation de mémoires MRAM et d'électronique logique reconfigurable

Aujourd'hui :
commutation par un champ magnétique appliqué de l'extérieur (peu directif)

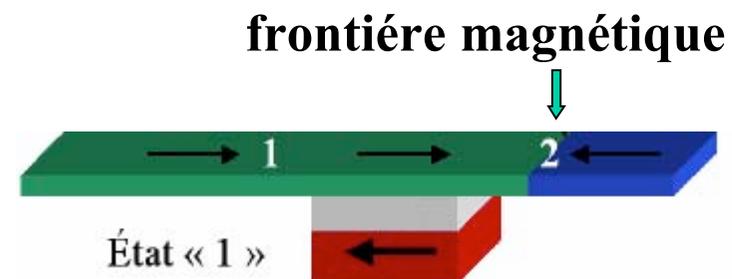
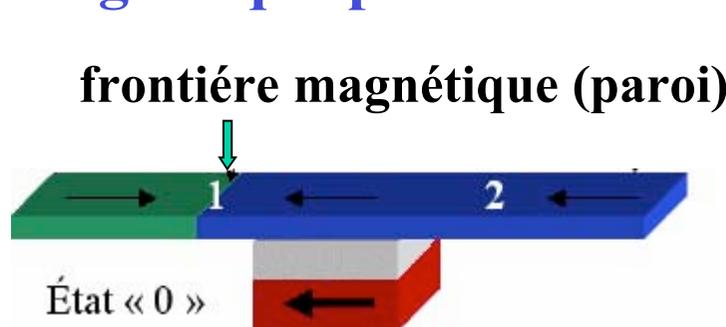


Demain, électroniquement

◦ par transfusion de spins

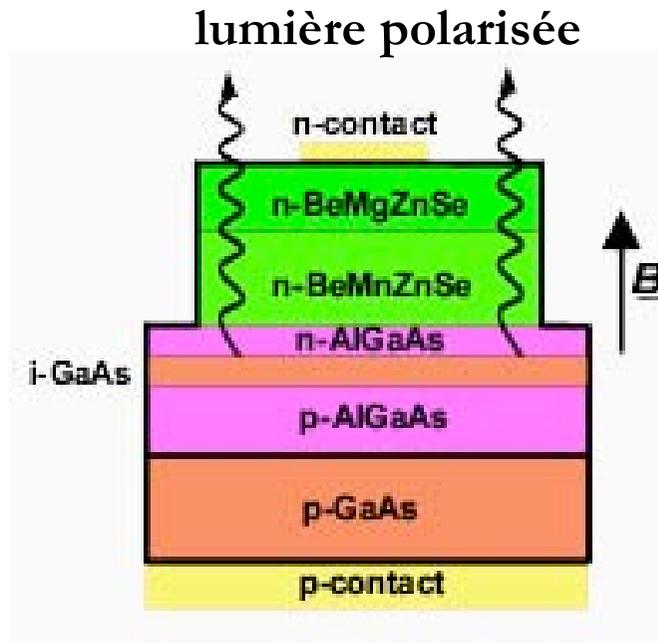


◦ ou en déplaçant une frontière magnétique par un courant de spins

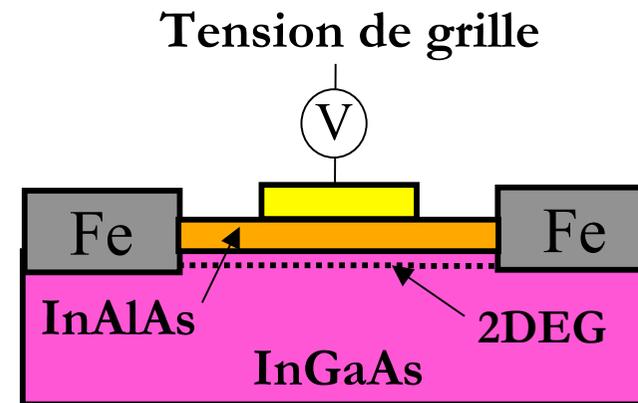


2) Spintronique avec semiconducteurs

Les semiconducteurs amènent: modulation de densité de porteurs, couplage à l'optique, tensions élevées, temps de vie des spins long,
Les matériaux magnétiques amènent: non-volatilité(MRAM, dispos. reconfigurables), avantages de la manipulation de spin pour vitesse, etc

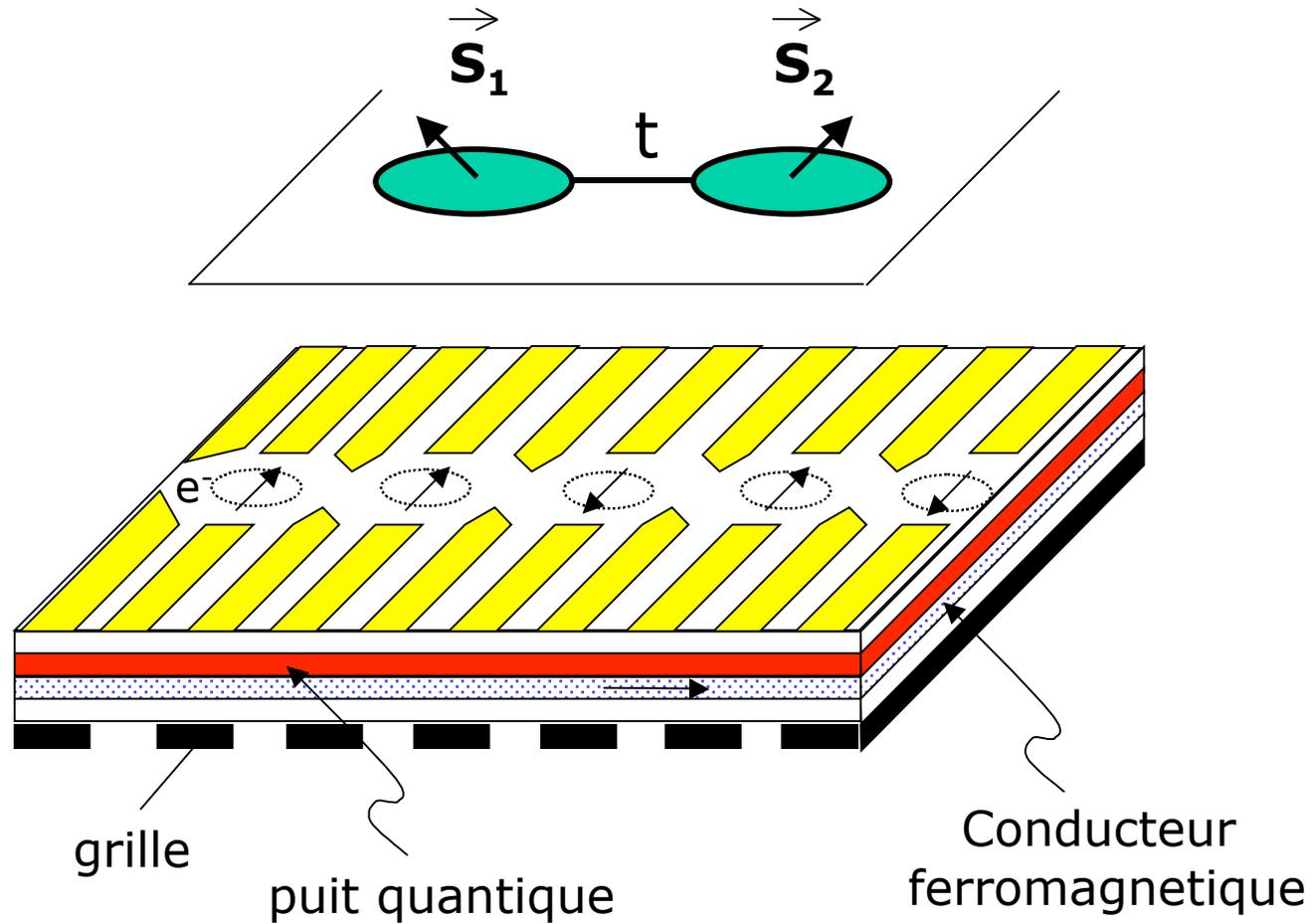


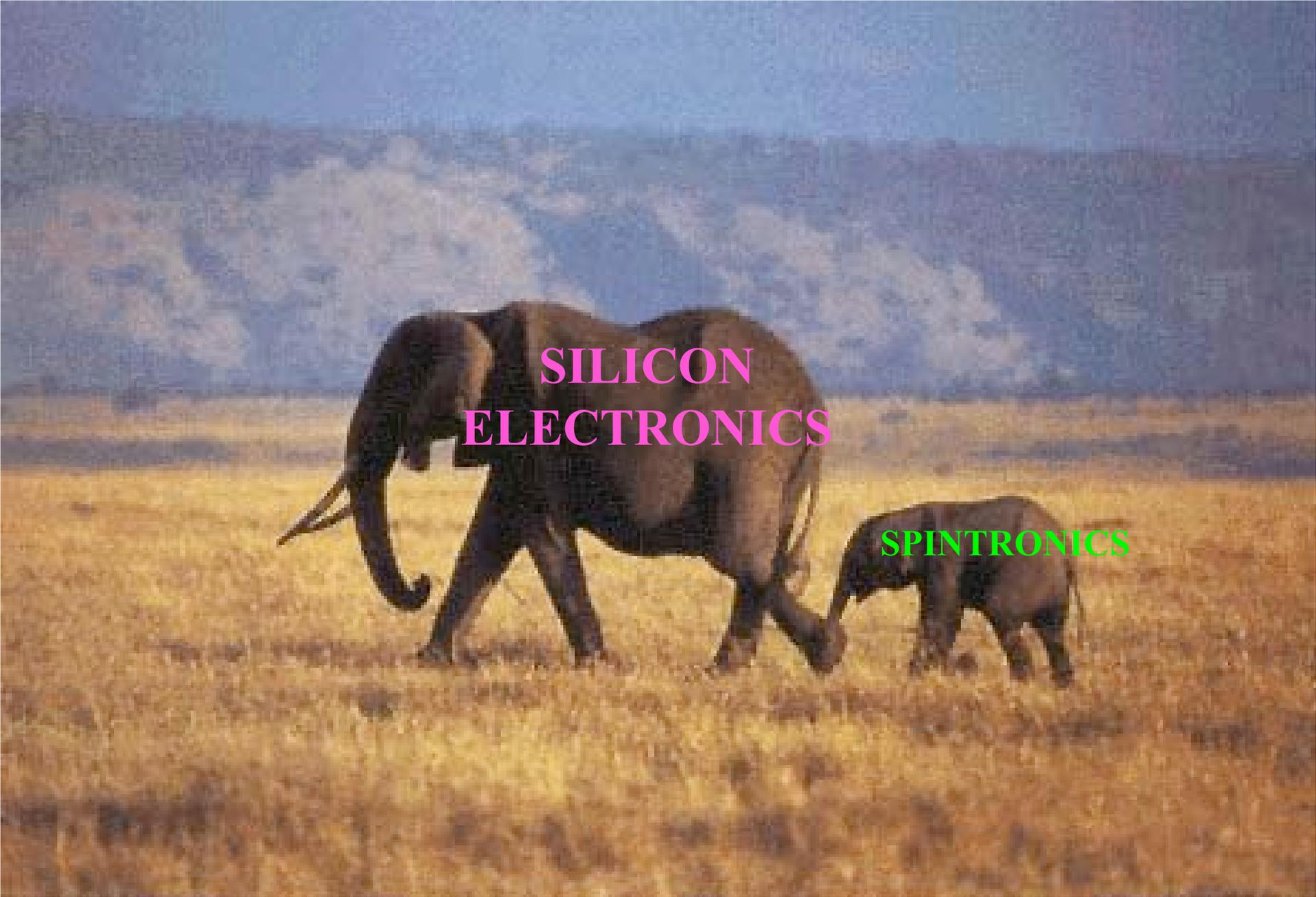
Spin-LED
(LED=Light emitting Diode)



Spin-FET
(FET=Field Effect transistor)

- **Qubit à spin (ordinateur quantique)**





**SILICON
ELECTRONICS**

SPINTRONICS