

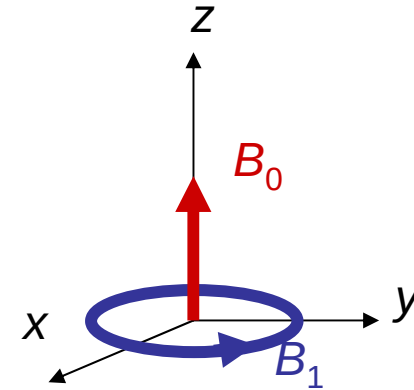
Résonance magnétique

mesure très précise de la pulsation de Larmor ω_0 par phénomène de résonance entre états de spin (Rabi, 1939)

Superposition de 2 champ magnétiques :

B_0 statique ; forte intensité

B_1 tournant : pulsation ω ; faible intensité



Forme de l'hamiltonien :

$$\hat{H} = -\hat{\mu} \cdot \vec{B} = -\mu_0 B_0 \hat{\sigma}_z - \mu_0 B_1 \cos(\omega t) \hat{\sigma}_x - \mu_0 B_1 \cos(\omega t) \hat{\sigma}_y$$

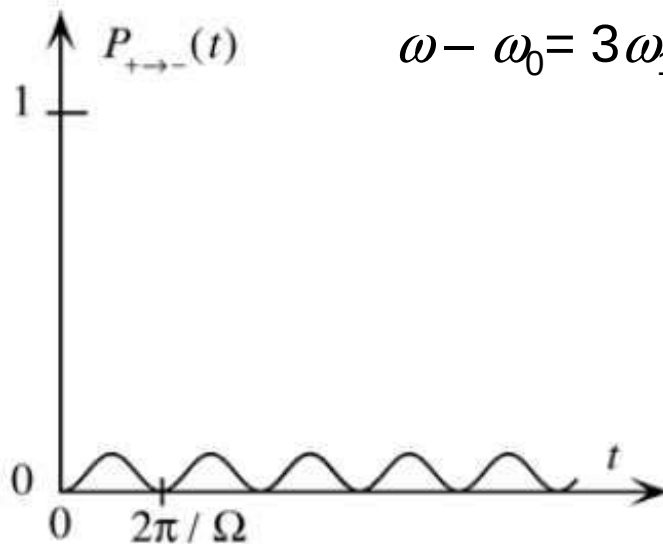
Fonction d'onde : $\psi(x, t) = a_+(t) |+\rangle + a_-(t) |-\rangle$

L'équation de Schrödinger conduit à :

$$\begin{cases} i \frac{d a_+(t)}{d t} = \frac{\omega_0}{2} a_+(t) + \frac{\omega_1}{2} e^{-i\omega t} a_-(t) \\ i \frac{d a_-(t)}{d t} = \frac{\omega_1}{2} a_+(t) e^{-i\omega t} - \frac{\omega_0}{2} a_-(t) \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{avec } \frac{\omega_0}{2} = -\frac{\mu_0 B_0}{\hbar} \\ \text{et } \frac{\omega_1}{2} = -\frac{\mu_0 B_1}{\hbar} \end{array}$$

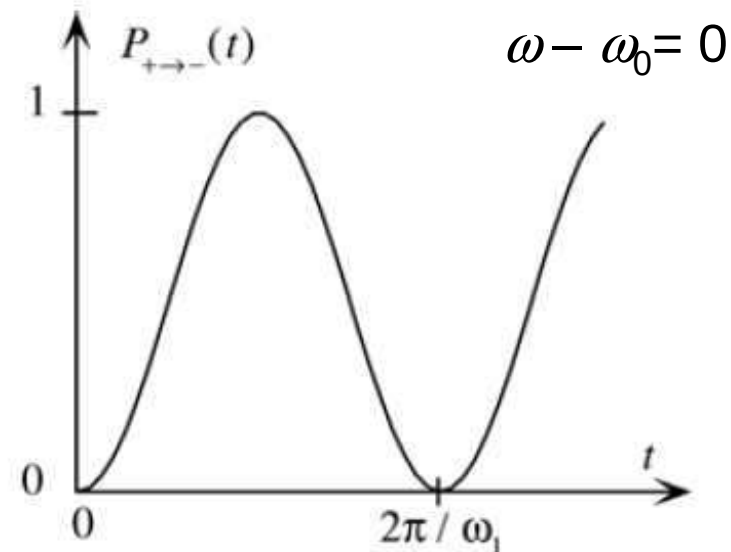
La probabilité de transition de l'état $|+\rangle$ vers l'état $|-\rangle$
 $\Leftrightarrow$ probabilité que la mesure de la composante z du spin soit $-\frac{\hbar}{2}$ est :

$$P_{+\rightarrow-}(t) = |a_-(t)|^2 = \left(\frac{\omega_1}{\Omega}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\Omega t}{2}\right) \quad \text{avec} \quad \Omega^2 = (\omega - \omega_0)^2 + \omega_1^2$$



cas $|\omega - \omega_0| \gg \omega_1$

probabilité faible de retournement du spin à tout instant

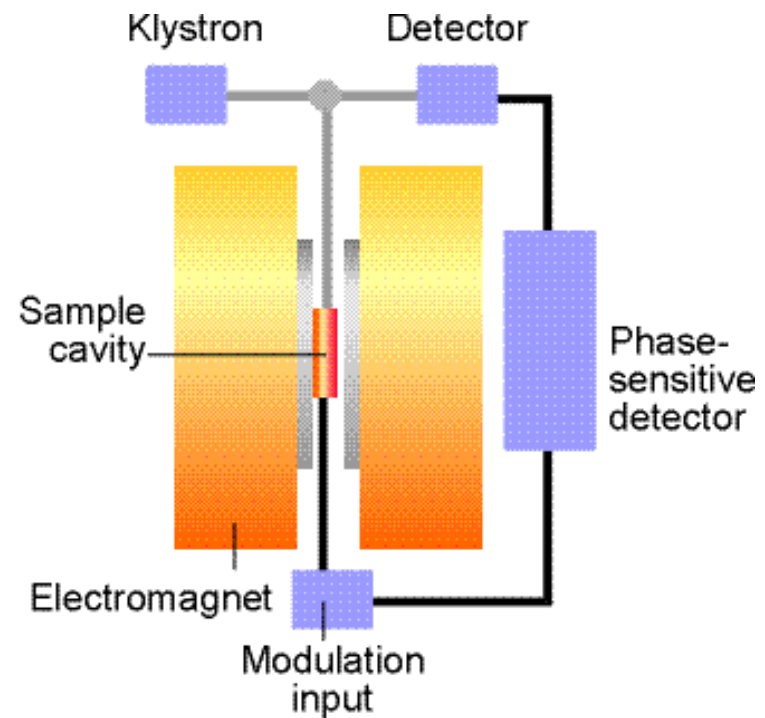
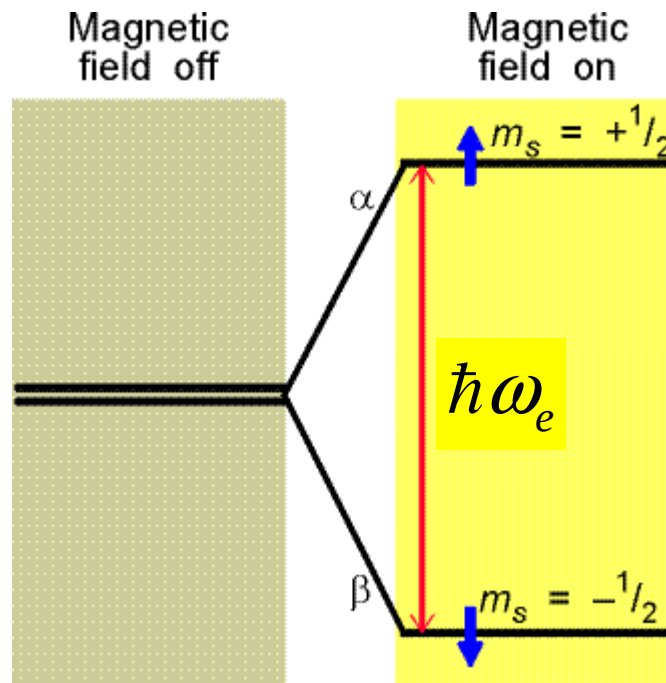


cas $|\omega - \omega_0| \ll \omega_1$

résonance :
 probabilité forte de retournement du spin à $t = (2n+1)\pi/\omega_1$
 même si B_1 faible

résonance magnétique électronique

transitions induites par absorption et émission stimulée

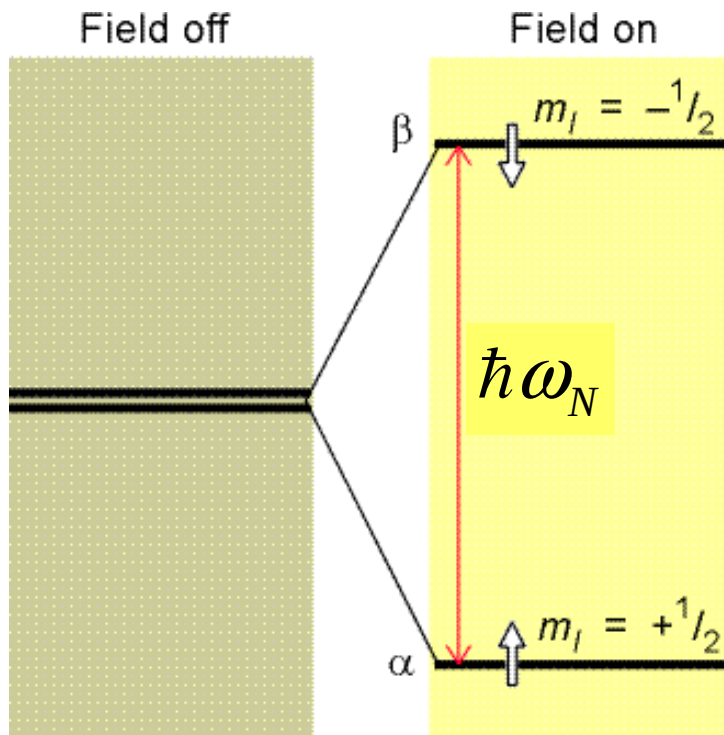


$$\frac{\omega_e}{2\pi} \sim 28 \text{ GHz}$$

résonance magnétique nucléaire

RMN

transitions induites par absorption et émission stimulée



Spin nucléaire:

$$|\vec{I}| = \sqrt{I(I+1)} \hbar$$

$$I_z = m_I \hbar$$

$$m_I = -I, -(I-1), \dots, (I-1), I$$

$$I = \frac{1}{2}$$

pour le proton

$$2,79 \frac{\omega_N}{2\pi} \sim 43 \text{ MHz}$$

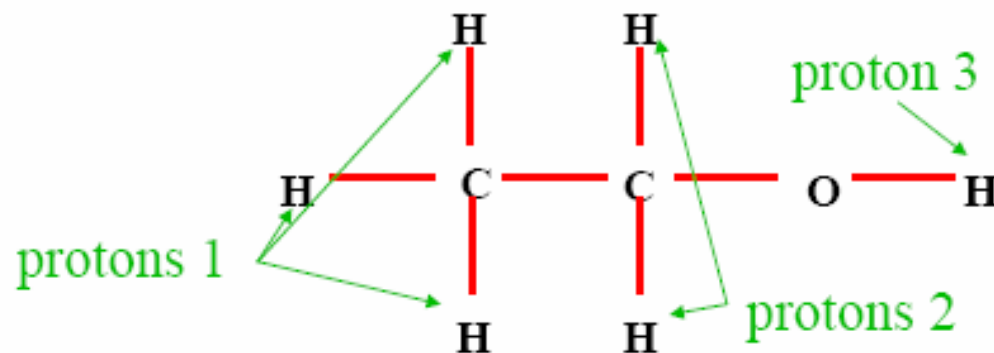
Buts d'une expérience de R.M.N.

Mesurer le nombre de noyaux d'une espèce donnée dans un échantillon

$$\gamma (\text{proton}) \neq \gamma (\text{phosphore}) \neq \gamma (\text{sodium})$$

Déterminer la molécule dans laquelle le noyau intervient

$$\begin{aligned} \gamma (\text{proton 1}) &\neq \gamma (\text{proton 2}) \\ &\neq \gamma (\text{proton 3}) \end{aligned}$$



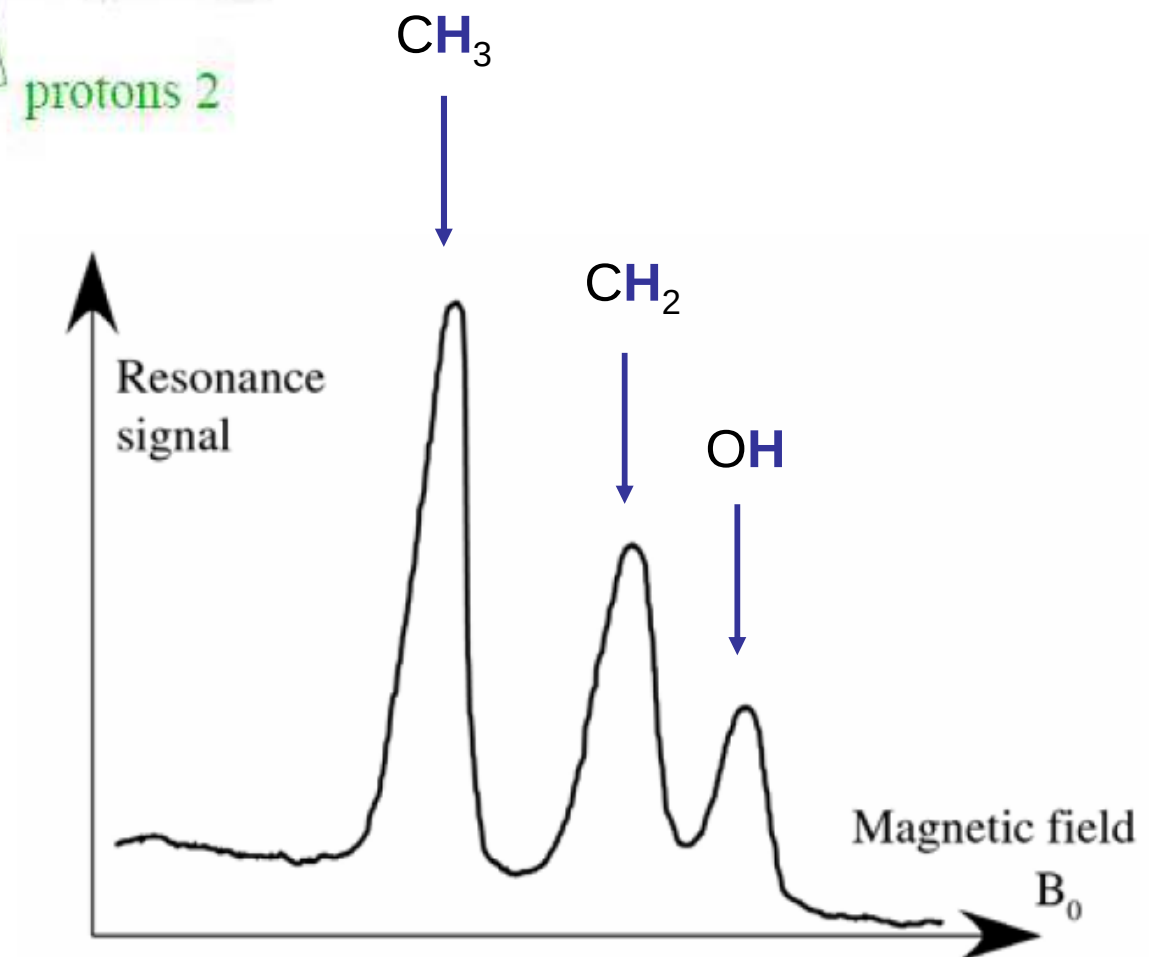
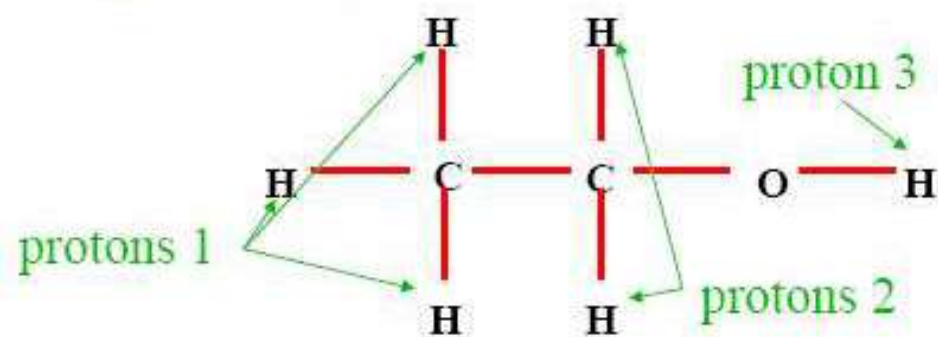
Mesurer la position du noyau dans l'échantillon : imagerie

La RMN en pratique

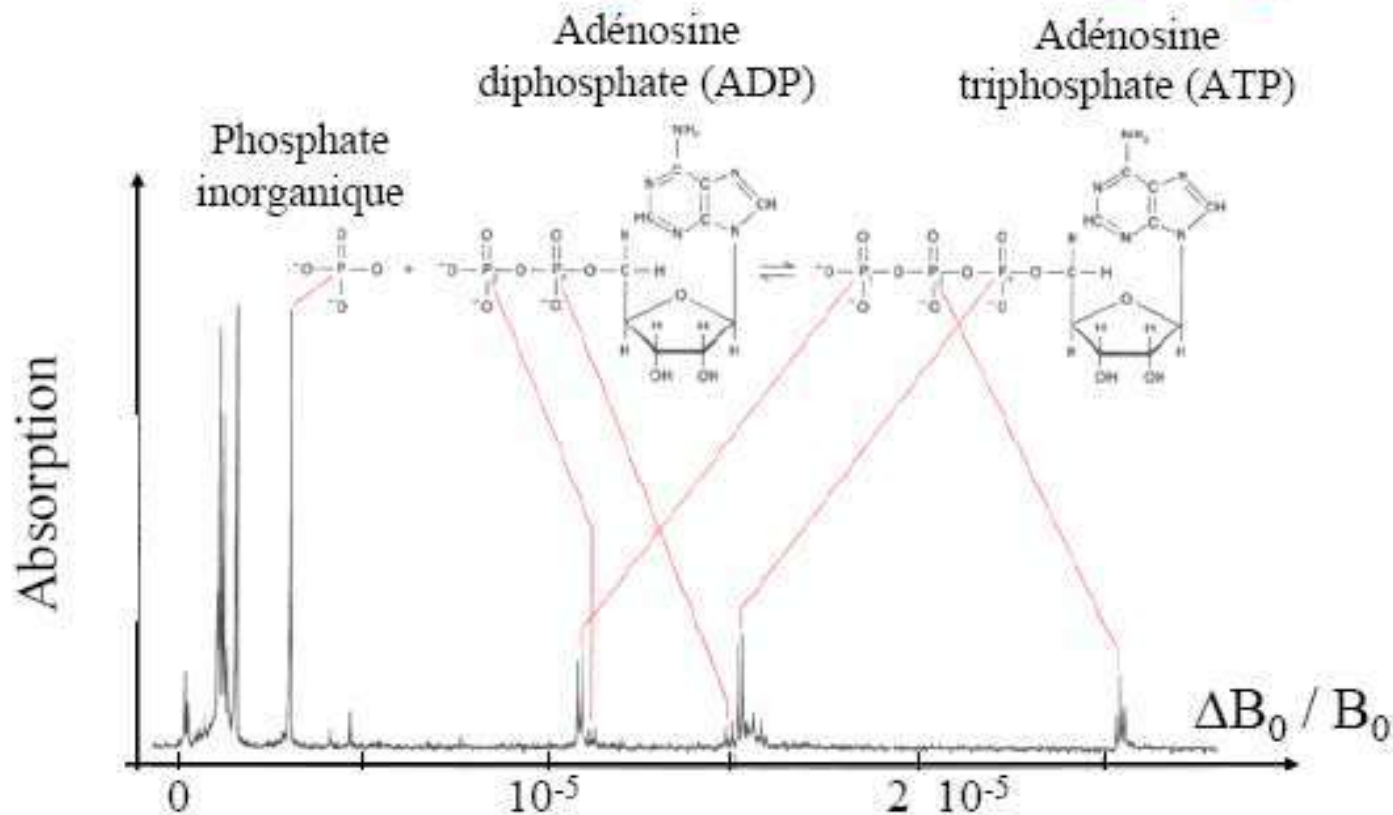
Champ B_0 important : de 1 à 10 Teslas

Pour 1 Tesla :	Noyau	$\omega_0 / 2\pi$
	H	42,57 MHz
	^{31}P	17,24 MHz
	^{23}Na	11,26 MHz

spectre RMN de l'éthanol $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$



La RMN en biologie : détection du phosphore

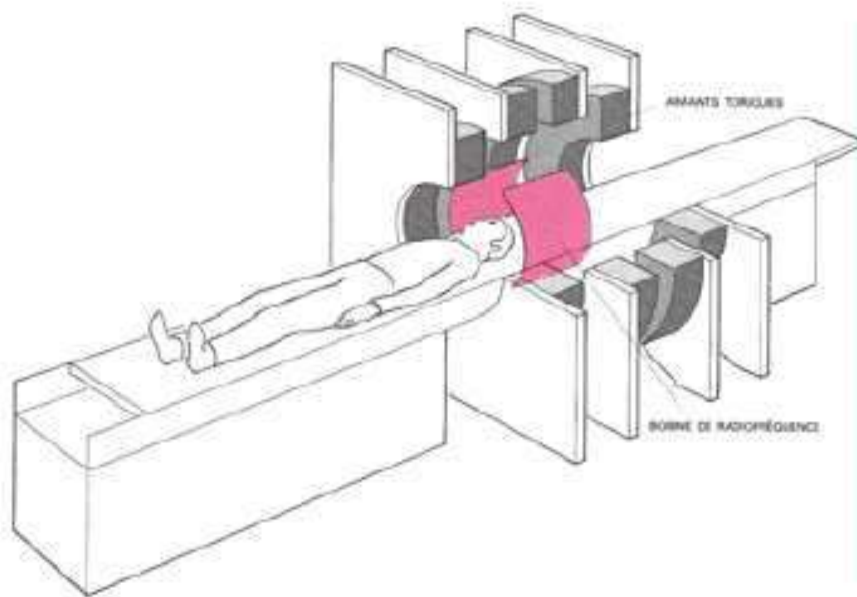


Contrainte importante : si la RMN est utilisée à des fins d'analyse, il faut que le champ B_0 soit homogène sur toute l'étendue de l'échantillon

La RMN en médecine

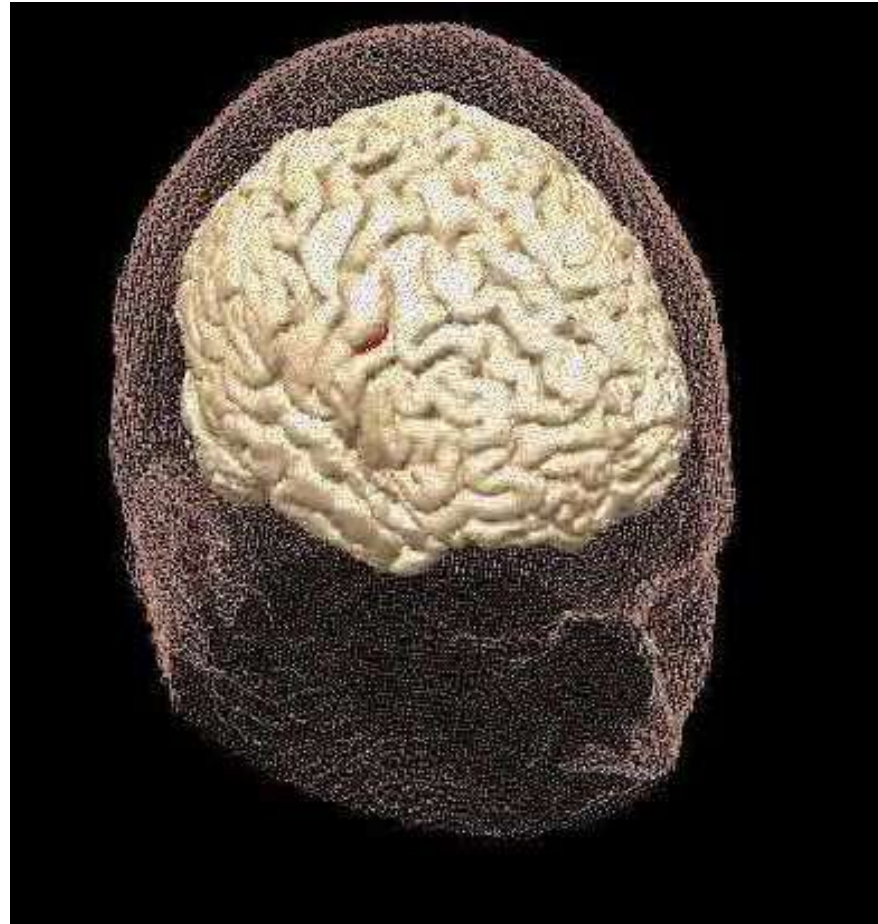
On regarde les protons de l'eau, en utilisant le fait que la teneur en eau d'une cellule malade est différente de celle d'une cellule saine.

On utilise des gradients de champ magnétique B_0 (coupes dans des plans donnés) et on reconstruit par ordinateur des images 3D.



Appareils chers : 3 M€

examples



L'électronique de spin

Du (nano)magnétisme à l'Electronique de spin (1)

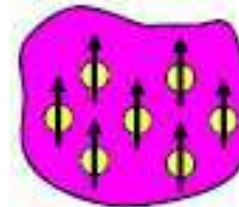
L'électron possède une charge et un spin



→ un moment magnétique

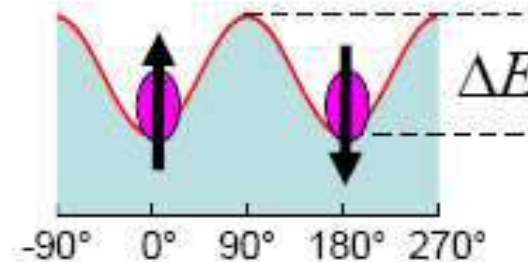
Dans un matériau ferromagnétique :

- interaction d'échange → aimantation



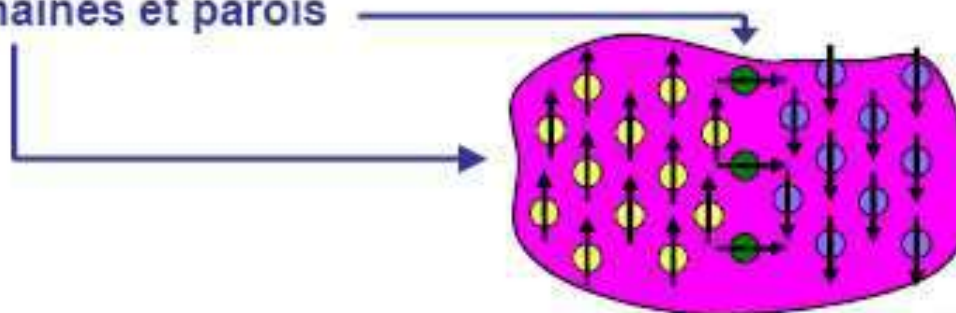
- anisotropie de l'énergie magnétique
→ axe de facile aimantation

→ *stockage non volatile de l'information binaire si $\Delta E \gg kT$*



- compétition entre différentes énergies magnétiques:

→ domaines et parois

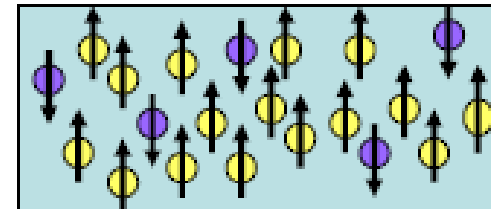


Du (nano)magnétisme à l'Electronique de spin (1)

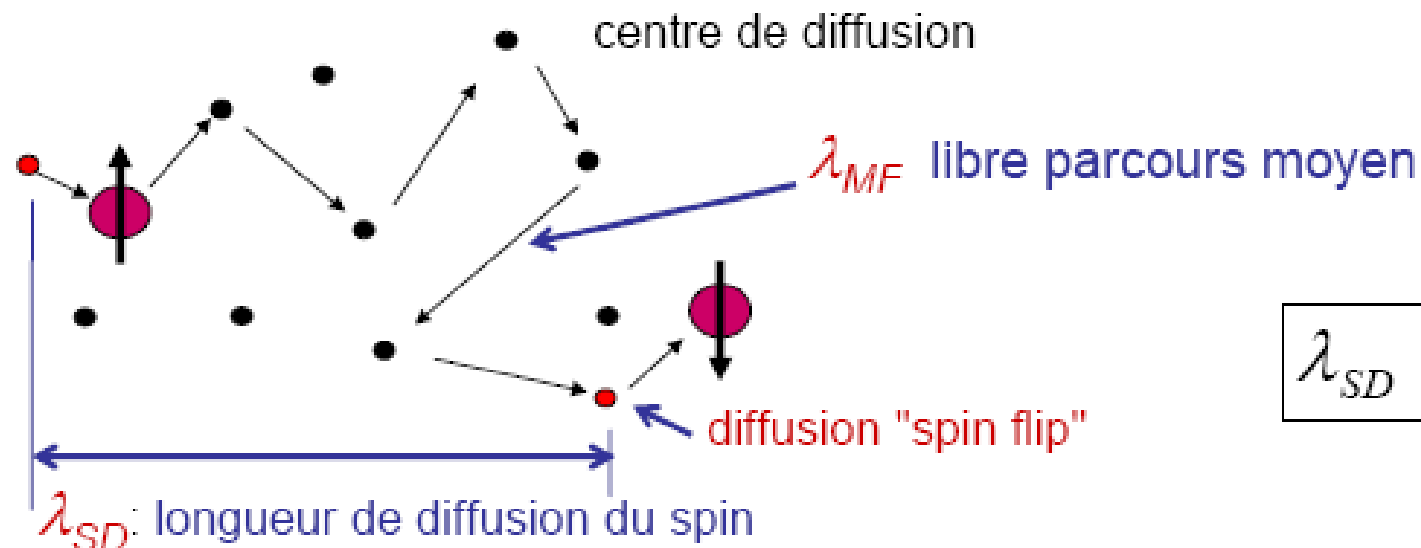
Dans un métal ferromagnétique (ex: Fe, Ni, Co, NiFe, ...)

- interaction d'échange

→ les électrons de conduction
sont polarisés en spin



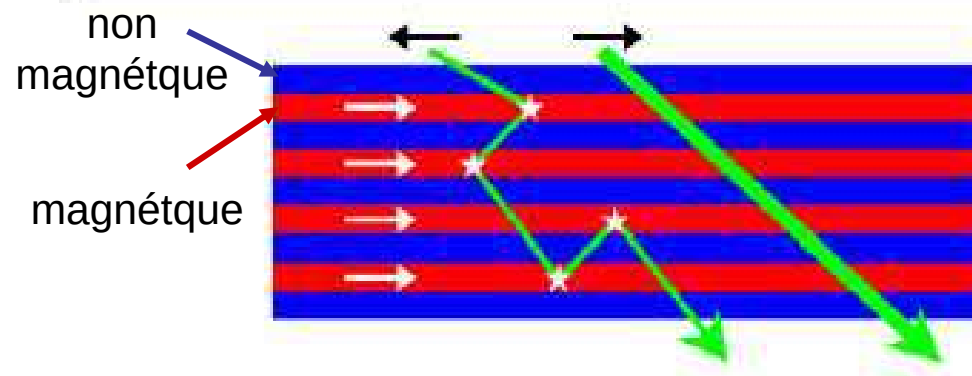
→ cette polarisation peut-être conservée par le transport diffusif



cf. Valet et al.,
PRB48(1993)7099.

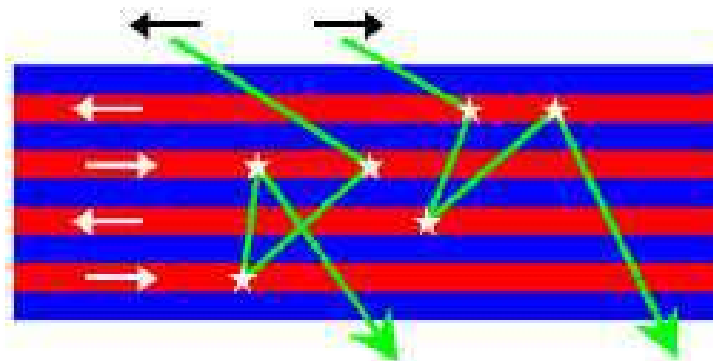
La magnétorésistance géante : premier effet de l'Electronique de Spin

A. Fert et al., 1988



P configuration

$$R_P < R_{AP}$$



AP configuration

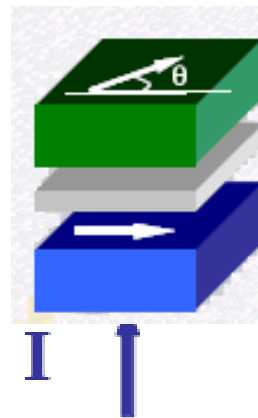
épaisseur des films $\ll \lambda_{MF} \ll \lambda_{SD}$

conservation du spin + **diffusion dépendant du spin**

L'effet tunnel dépendant du spin

1995 : la jonction tunnel magnétique

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



"free" ferromagnetic layer (NiFe)

tunnel barrier (Al_2O_3 , MgO, ...)

"pinned" ferromagnetic layer
(NiFe, Co, in contact with another layer)

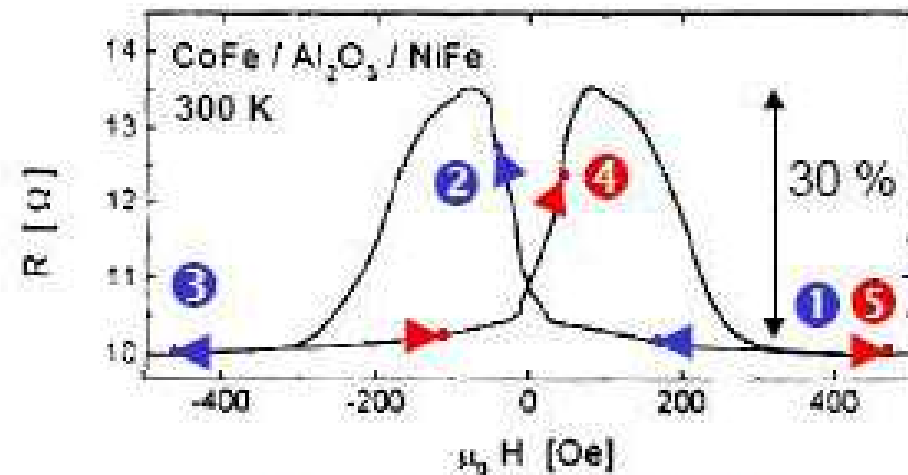
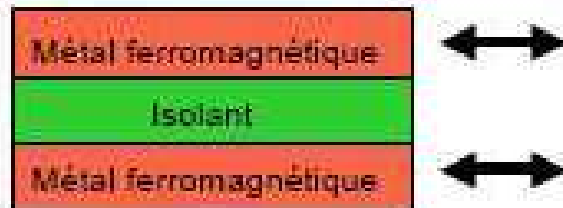
$$R = R_0 - \frac{\Delta R}{2} \cos(\theta) \quad \Delta R/R \uparrow \uparrow \sim 70 \% (\text{Al}_2\text{O}_3) \text{ à } 230 \% (\text{MgO})$$

+ dispositif vertical bien adapté aux IC haute densité !

→ Magnetic Random Access Memory (M-RAM)
(IBM > 1996)

Magnétorésistance tunnel (TMR)

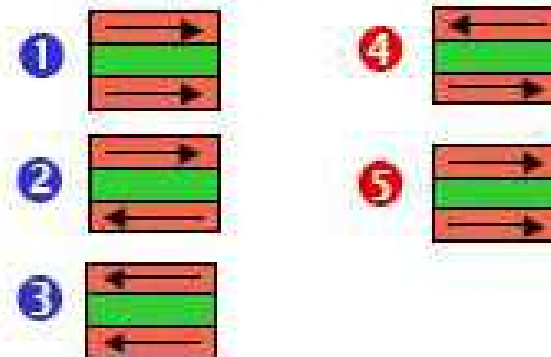
Jonctions tunnel magnétique



Principe physique :

Les électrons traversent l'isolant par *effet tunnel*. Selon leur spin ($\uparrow$ ou $\downarrow$), la probabilité de transmission est différente

- La résistance de la structure dépend de l'orientation relative de l'aimantation des couches FM.



Moodera et al, Annu. Rev. Mater. Sci. 29, 381 (1999)

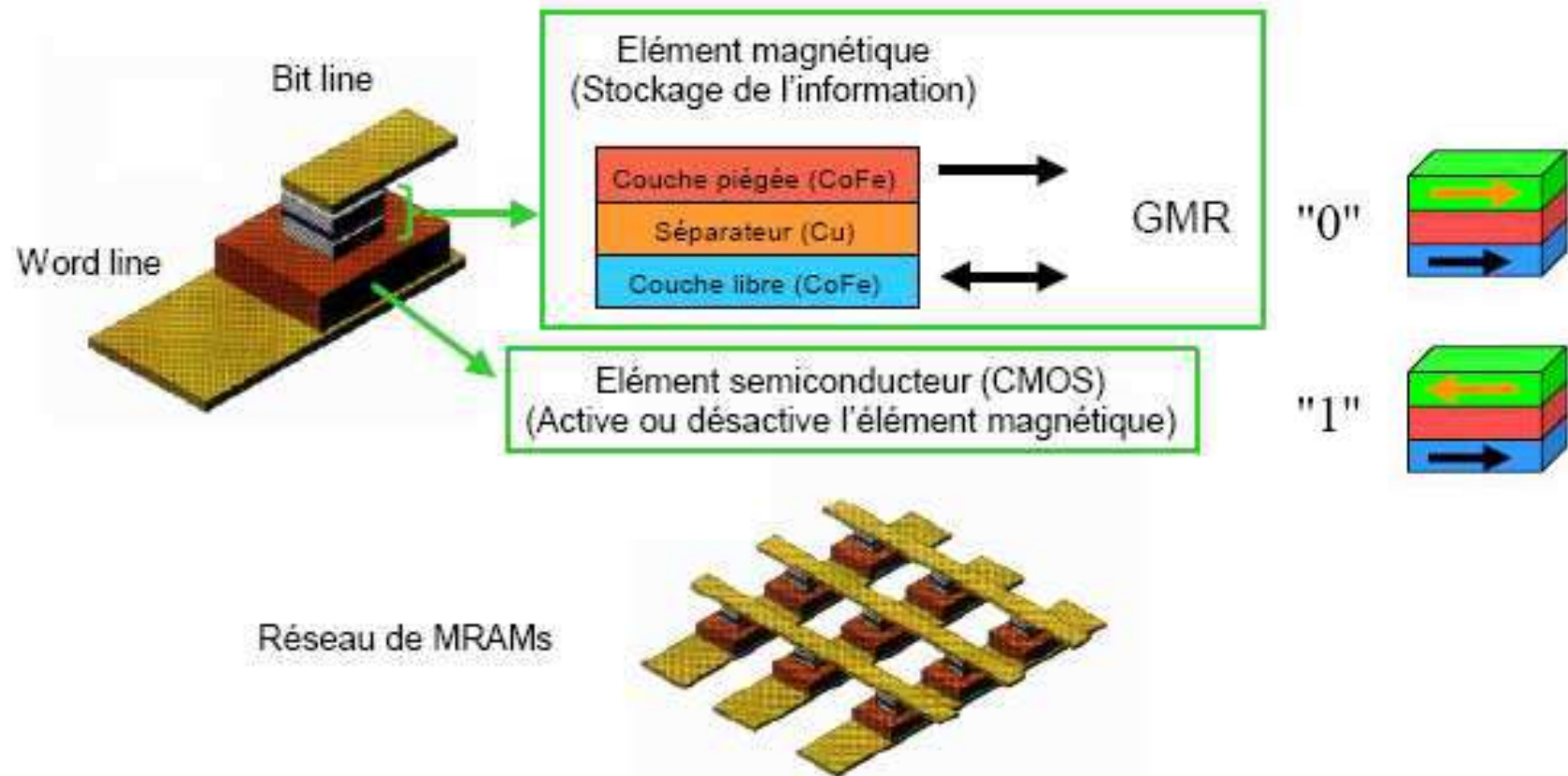
Application : Magnetic Random Access Memory

MRAMs

Description

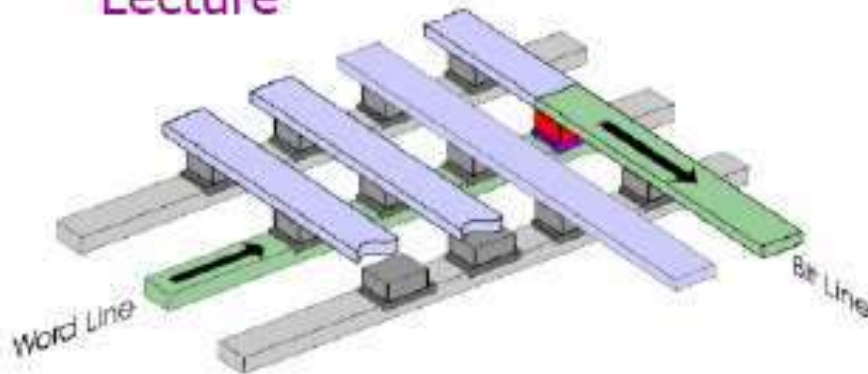
Mémoire non volatile

Technologie des MRAMs actuelles



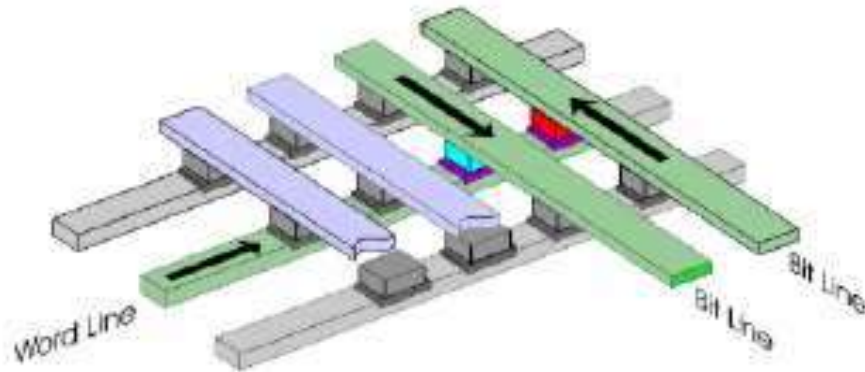
MRAMs

Lecture

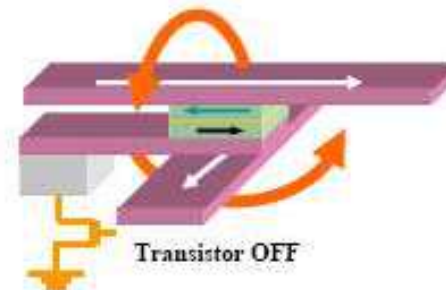


Sous l'application d'une tension entre la *Word Line* et la *Bit Line* adressant un élément MRAM, on mesure un courant qui donne l'état du bit.

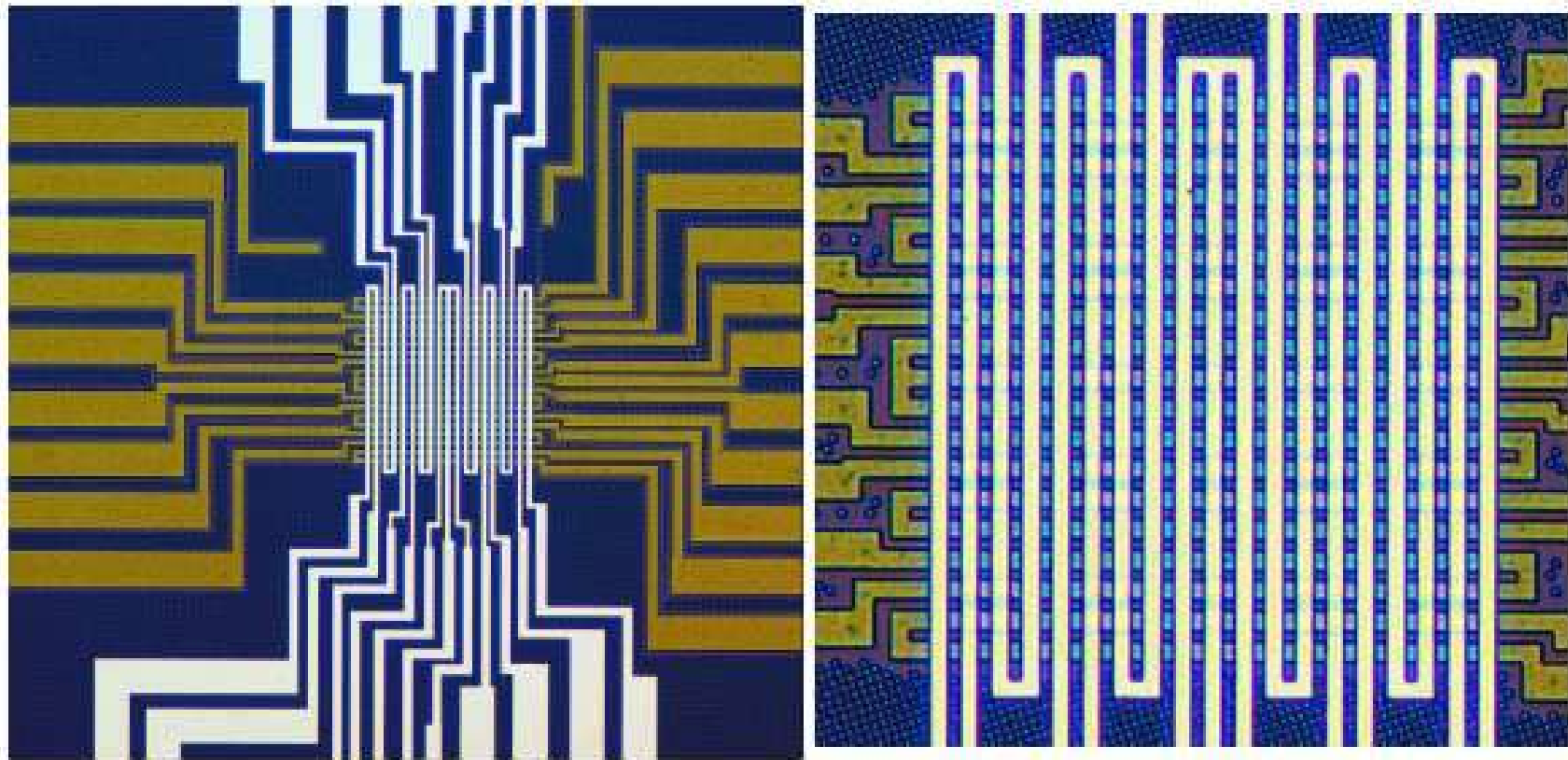
Ecriture / Effacement



Pour modifier l'état d'un bit, on applique une tension sur la *Word Line* ET sur la *Bit Line*. Les courants correspondants génèrent un champ magnétique qui permettent de modifier l'aimantation de la couche libre.



MRAMs



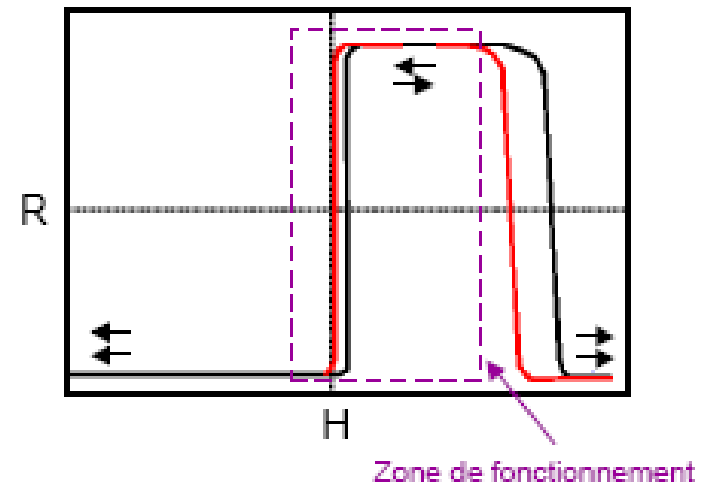
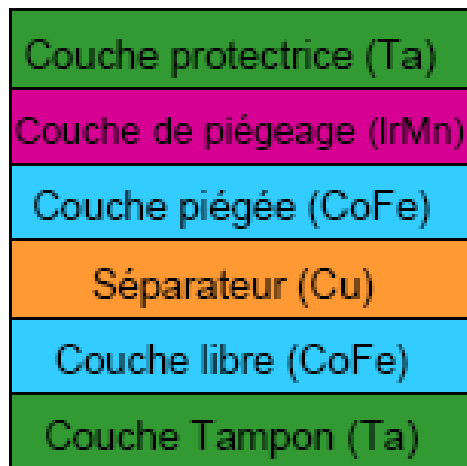
largeur de piste : env. 500 nm

Prototype de MRAMs fabriqué par IBM

Disque dur

Têtes de lecture

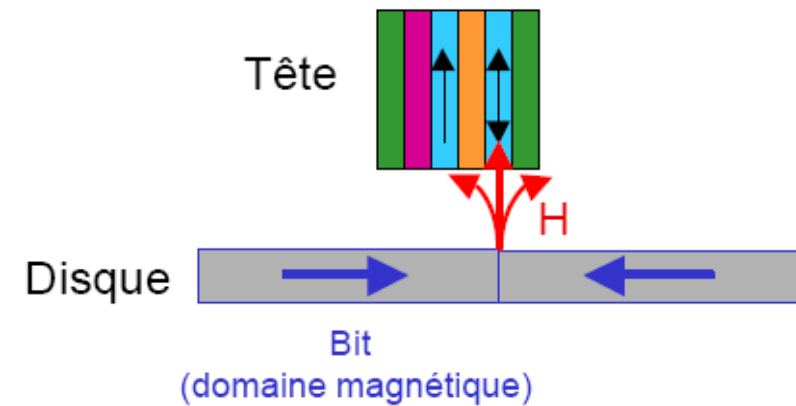
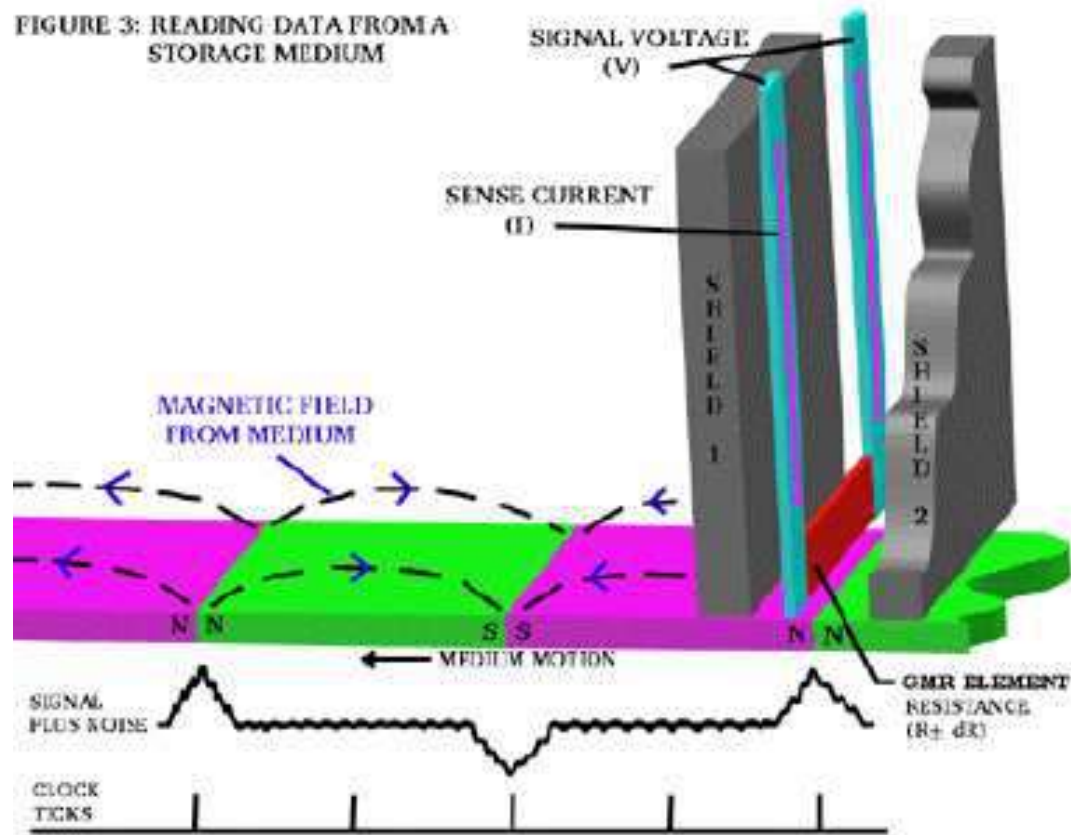
Structure de l'élément sensible (vanne de spin)



Disque dur

Tête de lecture à GMR

FIGURE 3: READING DATA FROM A STORAGE MEDIUM



Durant la lecture, les champs magnétiques générés entre les domaines induisent un retournement de l'aimantation de la couche libre.