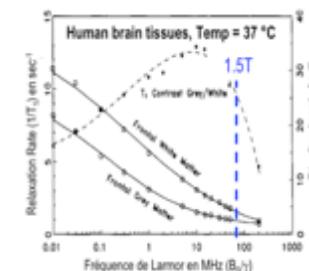
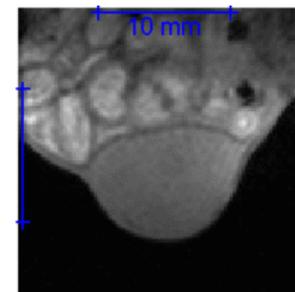
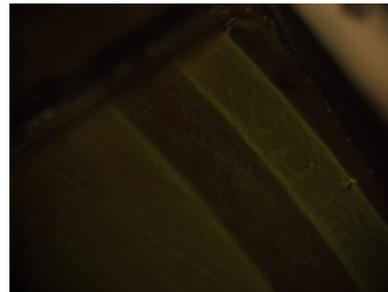
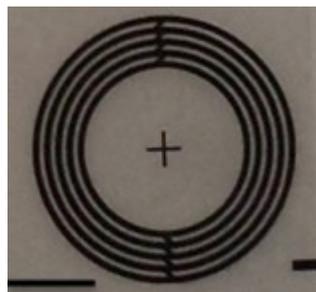


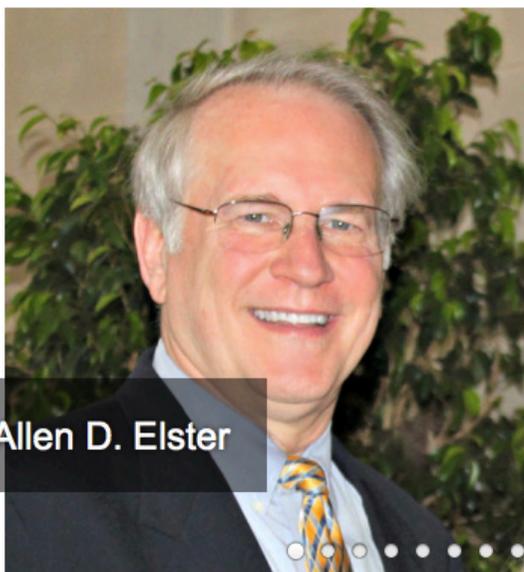
# L'imagerie par Résonance Magnétique

Marie Poirier-Quinot  
marie.poirier-quinot@u-psud.fr



# bibliographie

search



Allen D. Elster

**MRIQUESTIONS.com**

Click on an image to go directly to a topic of interest or press the button below to see a complete list

All Questions & Topics

## Chapter 3

MRI: recent advances and new horizons

General MRI principles	36
MRI signal detection hardware	39
Increasing polarization	40

Marie Poirier-Quinot, Ludovic de Rochefort, Olivier M Girard & Luc Darrasse

# Historique de la RMN l'IRM en 100 ans

**Onnes** : Découverte de la supraconductivité (Nobel en 1913)

**Stern** : Découverte du moment magnétique du proton (Nobel en 1943)

**Rabi** : Mise en évidence du phénomène de RMN (Nobel en 1944)

**Bloch & Purcell** : Application de la RMN sur l'eau et la parafine (Nobel en 1952)

**Effet BOLD- IMRf**

1911

1933

1938

1946

1971

1973

1975

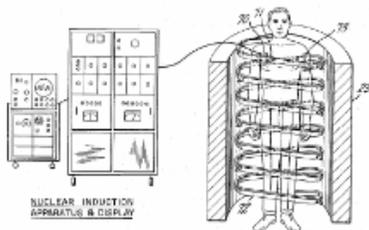
1977

1980

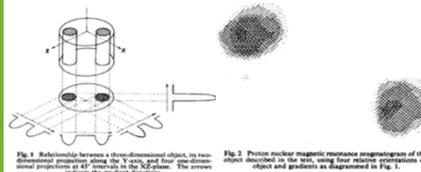
1992

2006

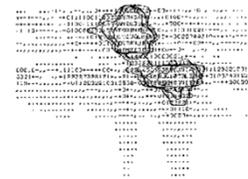
**Damadian** : Utiliser la RMN en Médecine pour différencier les tumeurs malignes des tumeurs bénignes (Science & Brevet)



**Lauterbur** : Méthode des projections circulaires utilisant un gradient tournant (Nature en 1973 & Nobel en 2003)



**Ernst** : L'information spatiale est codée dans la phase



**Mansfield** : Méthode des lignes utilisant deux gradients orthogonaux fixes (1<sup>ère</sup> image *in vivo* de l'anatomie humaine & Nobel en 2003).

**Damadian & FOMAR** : 1<sup>er</sup> IRM



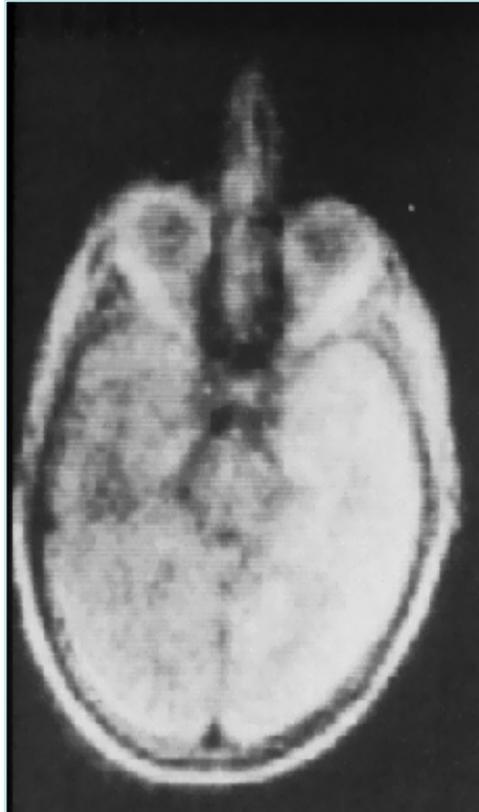
**Importants développements** : champs, gradients, antennes, séquences, logiciels.

**1<sup>er</sup> IRM 7T en France** (Neurospin)

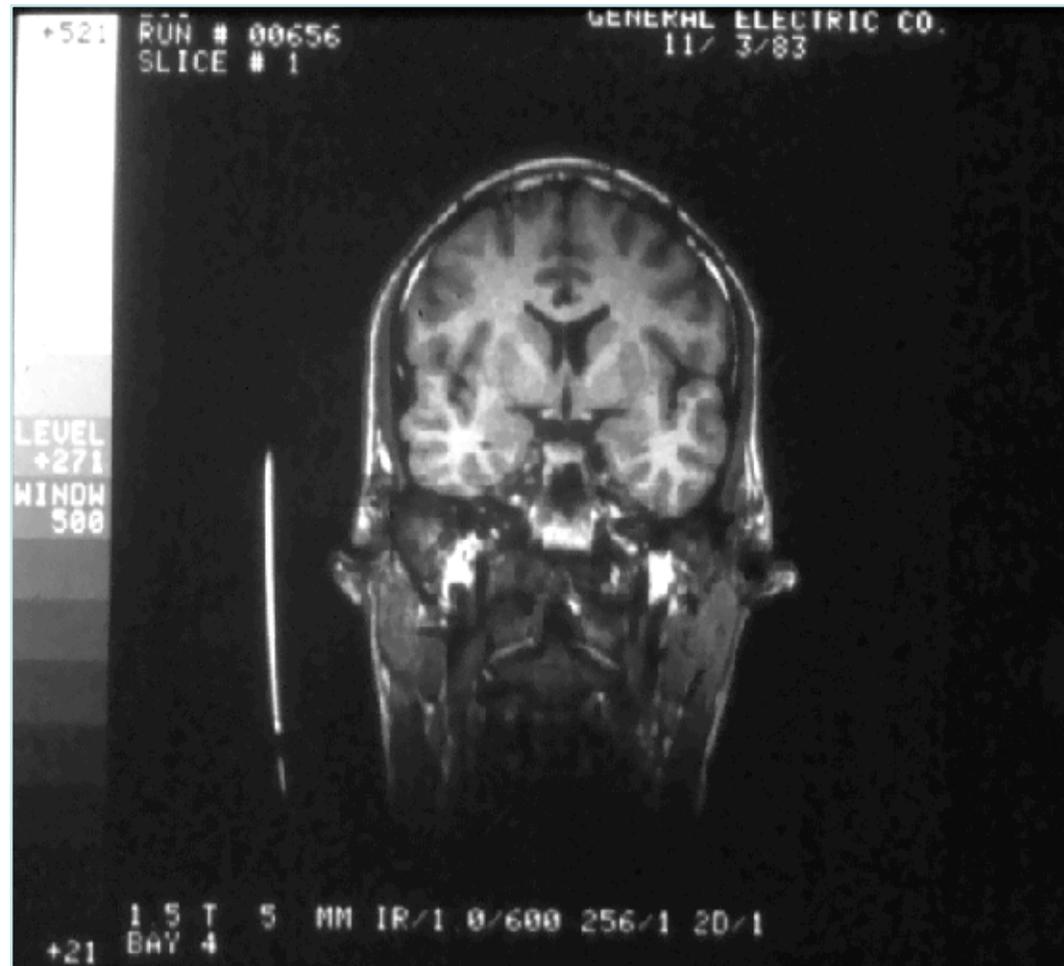
# 1973 : Première image (P.C. Lauterbur, Nature)



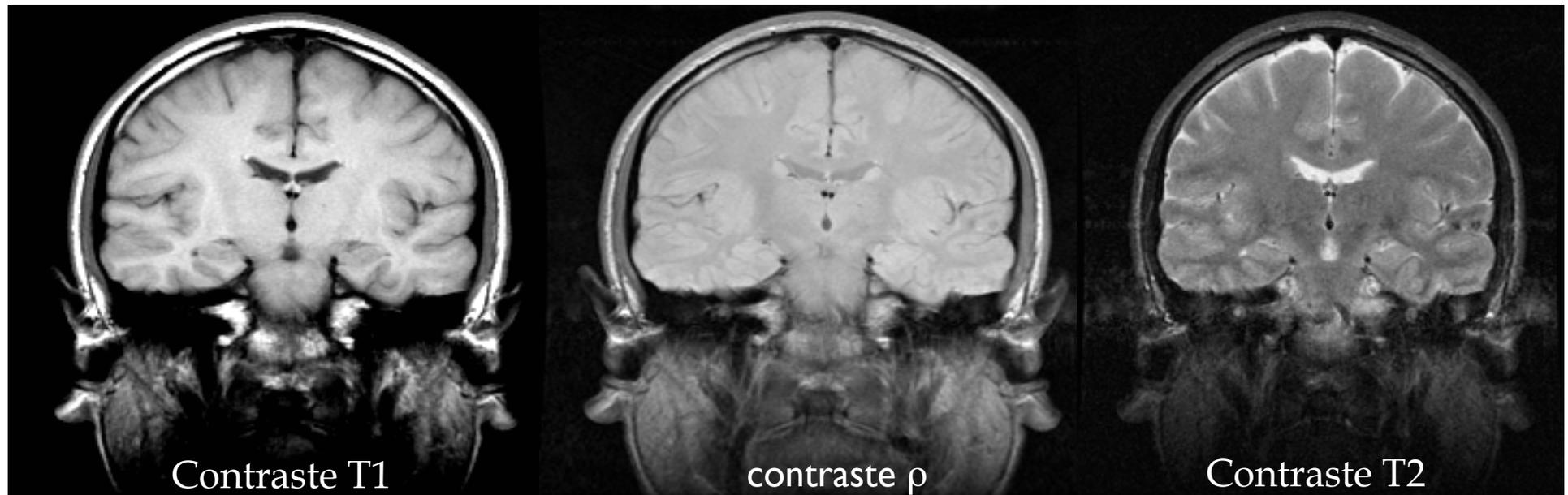
# 1979 : Premières images en multiples incidences : Moore et al.



# 1983 : Premières Images à 1,5 teslas (General Electric)



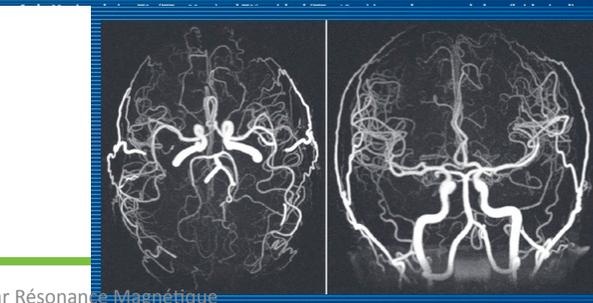
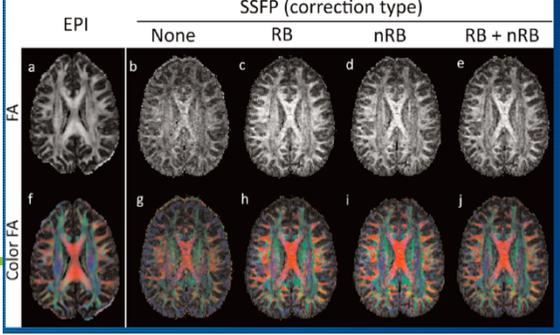
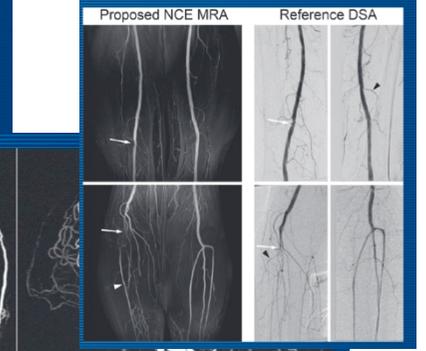
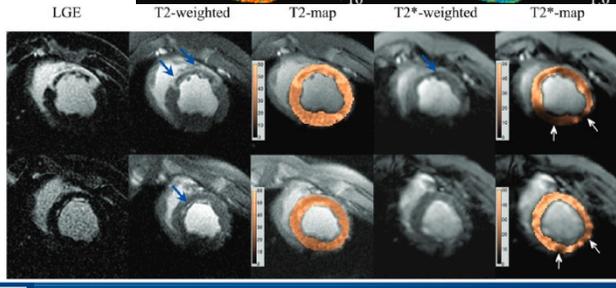
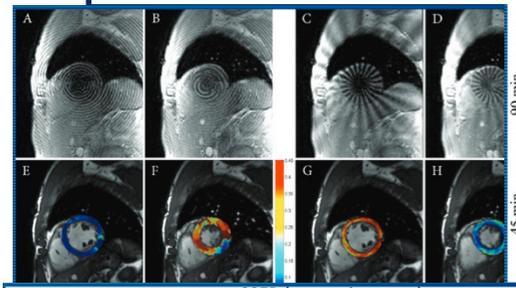
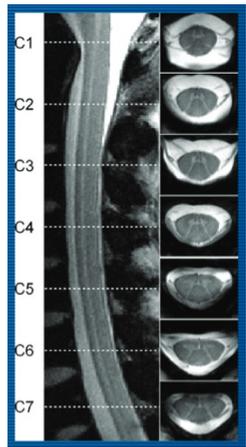
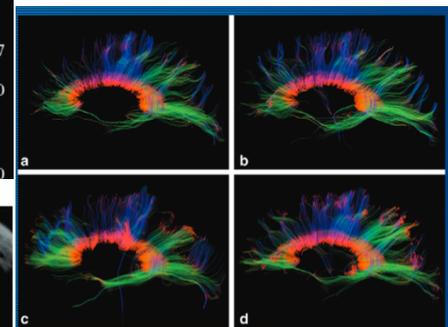
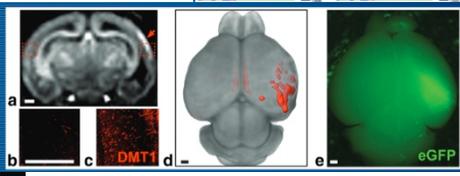
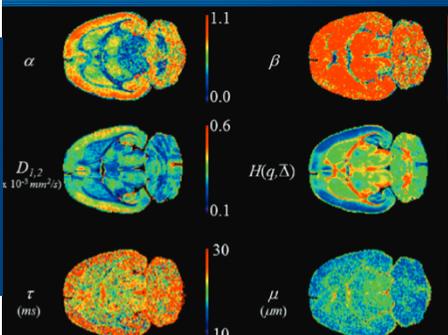
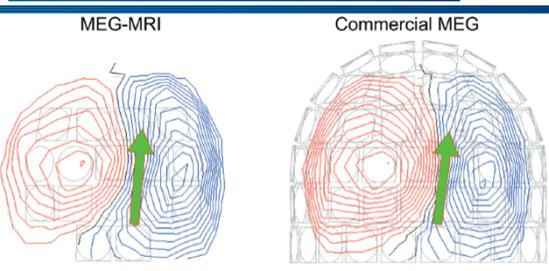
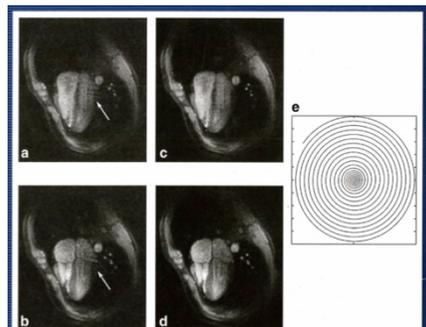
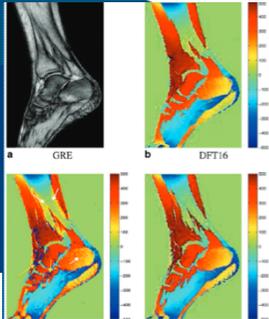
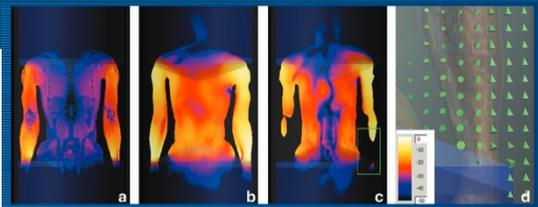
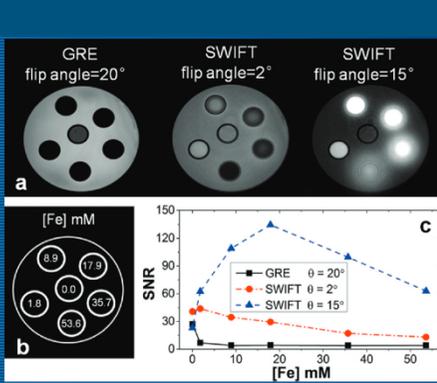
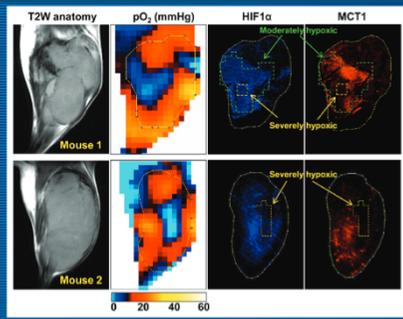
# 2005 @ 1,5 teslas (General Electric)



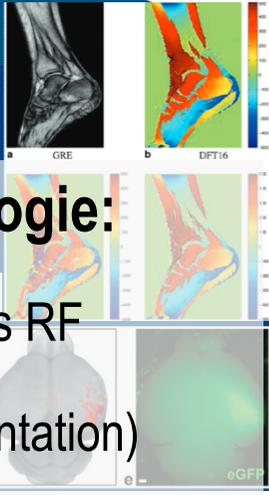
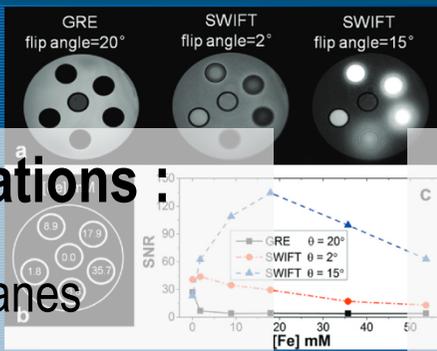
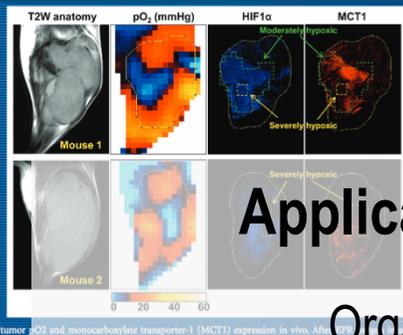
# 2000 : Spectromètre RMN 900 MHz (21 T)



# Recherche en IRM – versatile



# Recherche en IRM – versatile

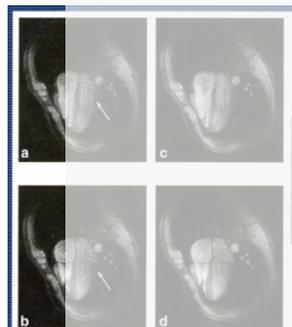


Applications

Technologie et méthodologie:

Organes

Instrumentation - Antennes RF



Pathologie

Structure

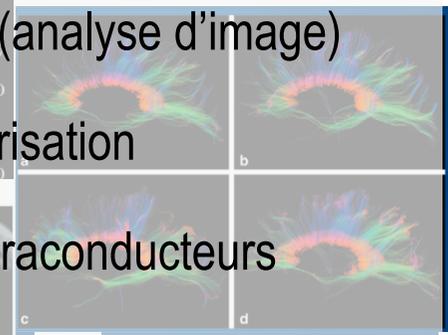
Fonction



Séquences (Transfert d'aimantation)

Traitement de signal (analyse d'image)

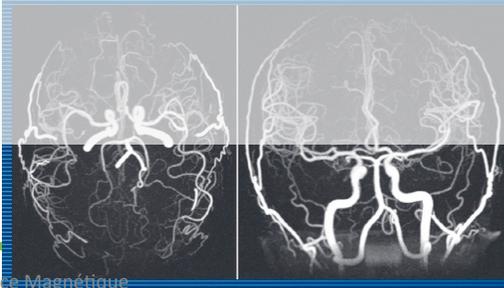
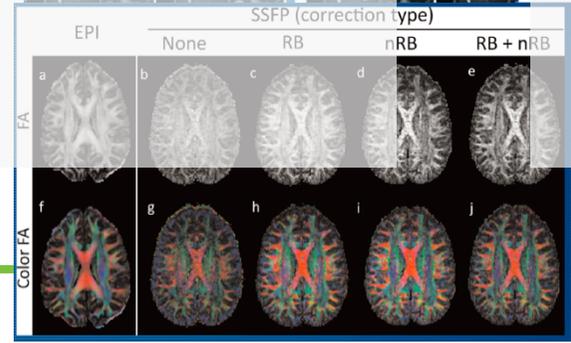
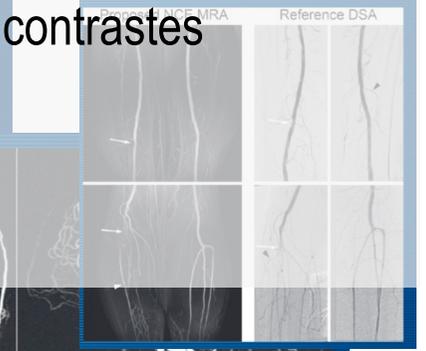
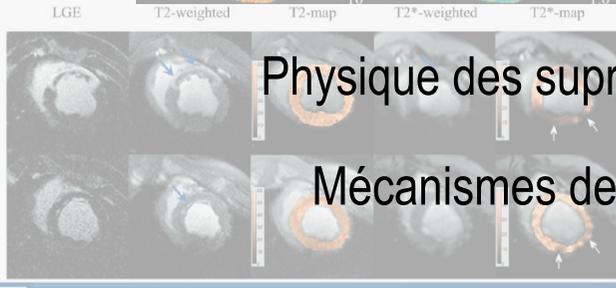
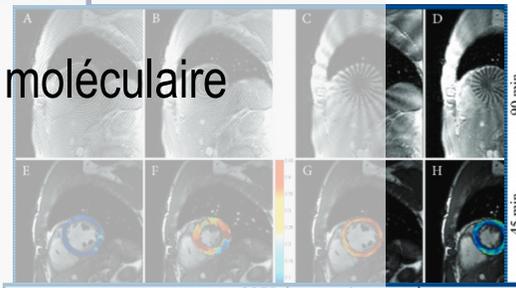
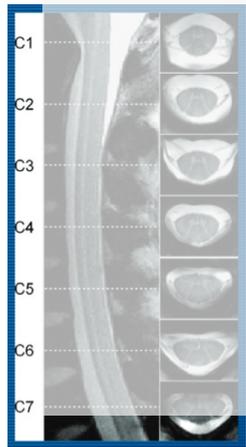
Hyperpolarisation



moléculaire

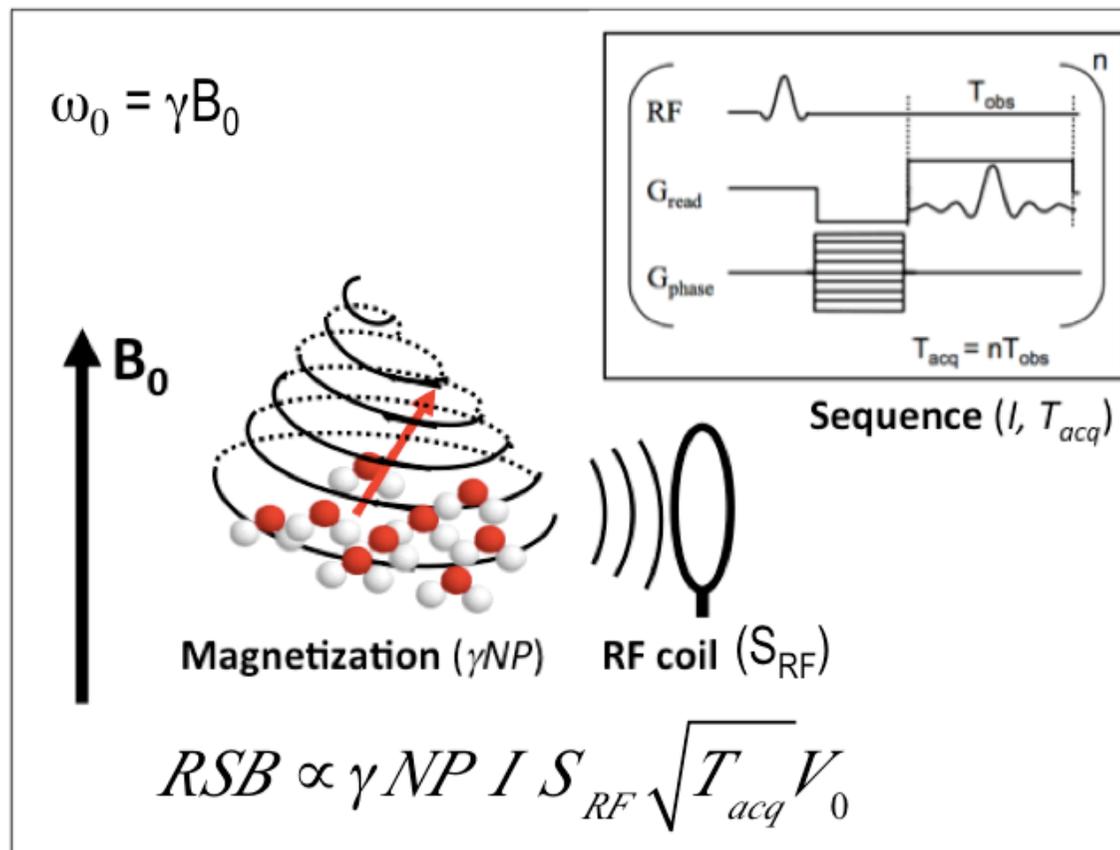
Physique des supraconducteurs

Mécanismes de contrastes



# Résonance Magnétique Nucléaire en résumé

polarisation



# Polarisation - Aimantation Macroscopique



En l'absence de champ magnétique externe, les moments de spin des noyaux d'un échantillon sont distribués uniformément (ils pointent dans n'importe quelle direction).

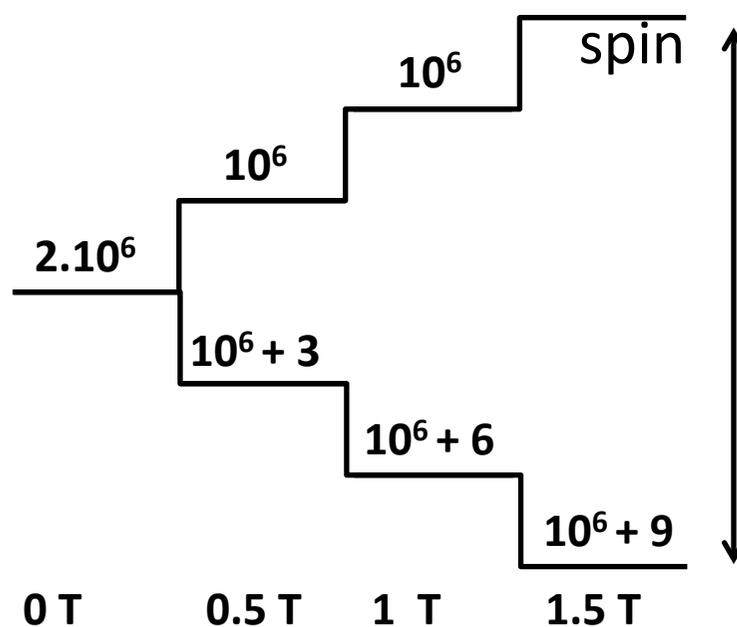
Le moment magnétique TOTAL d'un échantillon est donc NUL.

# Une page de physique quantique

effet Zeeman = interaction entre le champ magnétique et le spin

Fréquence de Larmor

$$\omega_0 = \gamma B_0$$



$$\Delta E \propto \gamma B_0 h$$

A 1.5T, pour tous les 2 millions de protons, il y en a 9 de plus alignés avec le champ  $B_0$  qu'alignés en sens opposé.

# La pire page de math... de cet exposé

Combien de protons sont en “excès” dans un **voxel** à 1.5T

voxel 2x2x5 mm = .02 ml

- $N = 6.02 \times 10^{23}$  molécules par mole
- 1 mole d'eau = 18 grams ( $^{16}\text{O} + 2^1\text{H}$ )
- 1 voxel d'eau possède:  $2 \times 6.02 \times 10^{23} \times 0.02 / 18 = 1.328 \times 10^{21}$  de protons total
- Le nb de protons en excès :

$$1.328 \times 10^{21} \times 9 / (2 \times 10^6) = \mathbf{6.02 \times 10^{15}}$$

# polarisation

Aimantation nucléaire à l'équilibre thermodynamique  
(statistique de Boltzmann)

Polarisation 
$$P = \frac{\gamma B_0 \hbar}{kT}$$

Le champ magnétique total des protons en excès est appelé **aimantation nucléaire**  $M_0$ , moyenne des moments magnétiques de spin des noyaux par unité de volume

Le nb de protons en excès est tel qu'on peut ignorer les mécanismes de physique quantique et se concentrer sur les mécanismes classiques

# Une dernière page de physique quantique

Energie:  $\Delta E = h\nu$

X-rays :  $\nu \sim 10^{19}$

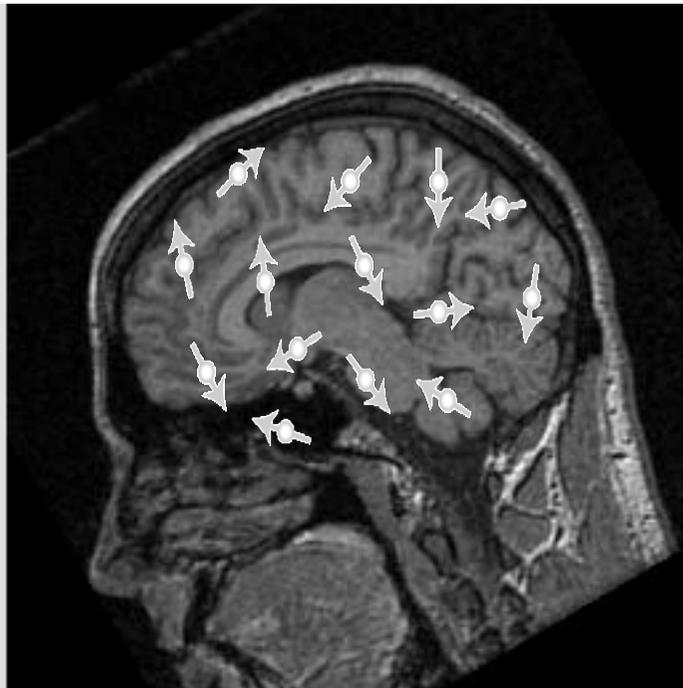
UV :  $\nu \sim 10^{16}$

Visible :  $\nu \sim 10^{14}$

Ondes Radio :  $\nu \sim 10^7$  (IRM)

**L'IRM est capable de réaliser des images de haute qualité non pas grâce aux énergies impliquées, mais grâce aux grands nombres de spins nucléaires observés.**

# Aimantation Macroscopique



En l'absence de champ magnétique externe, les moments de spin des noyaux d'un échantillon sont distribués uniformément (ils pointent dans n'importe quelle direction).

Le moment magnétique TOTAL d'un échantillon est donc NUL.

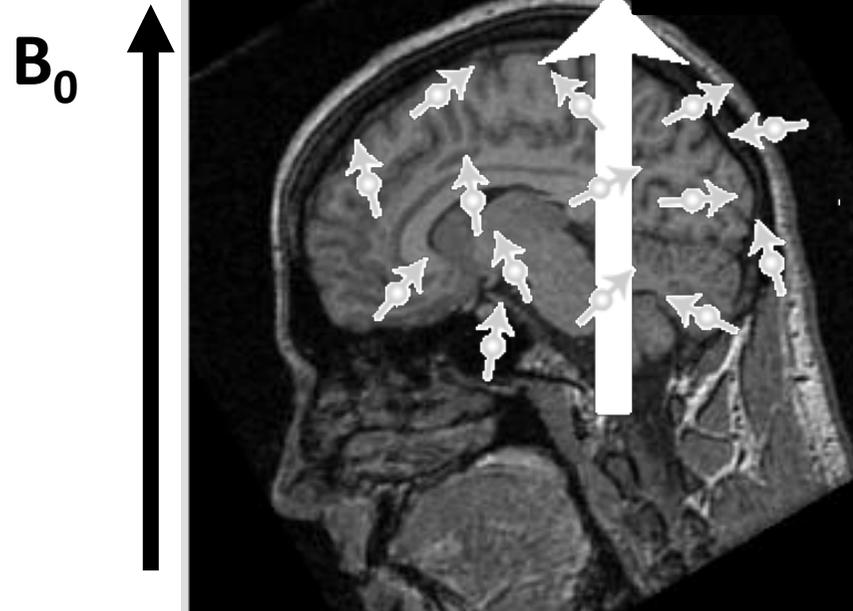
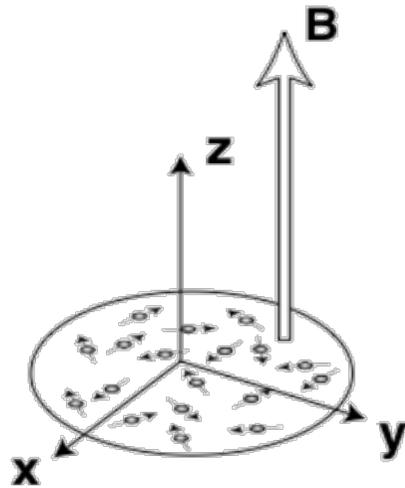
# Aimantation Macroscopique

$M_0$  aimantation macroscopique  
 $\rho$  densité de proton  
 $\chi$  Susceptibilité magnétique



À l'équilibre thermodynamique

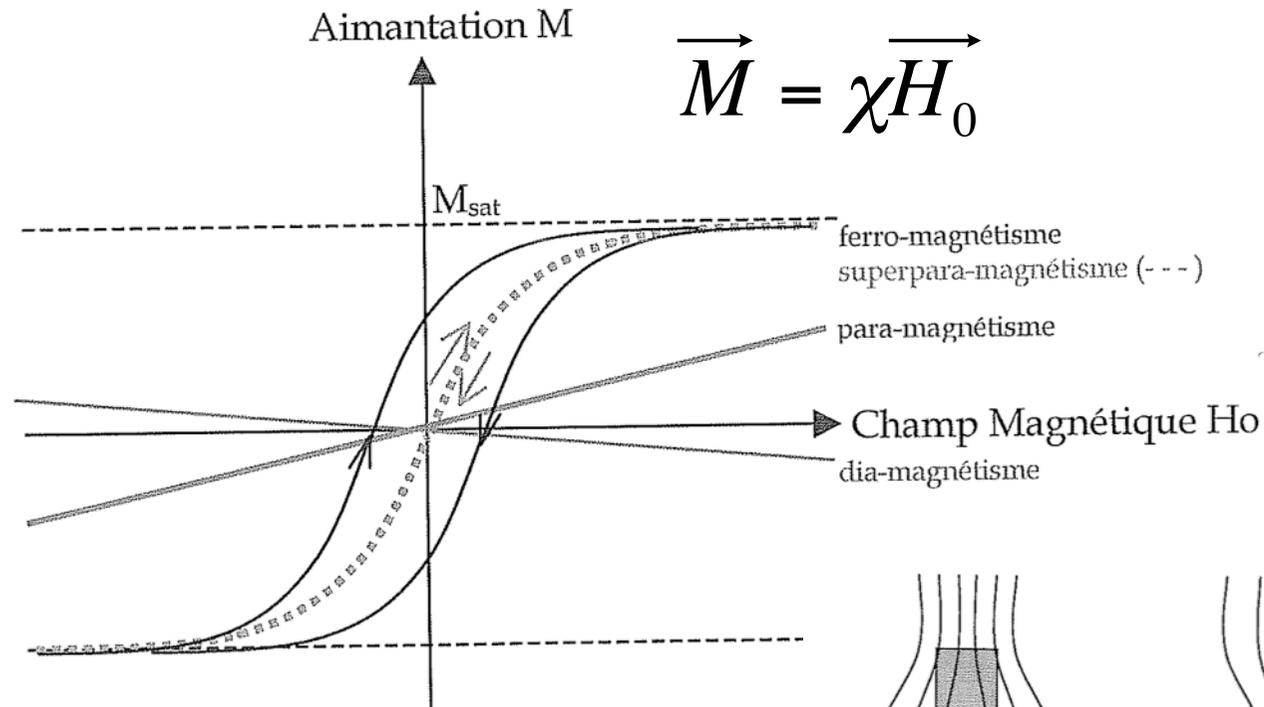
# Aimantation Macroscopique



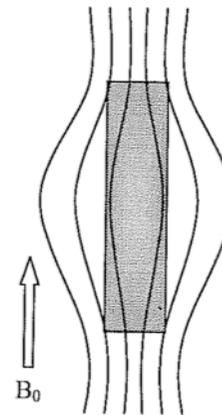
Pas de cohérence  
Pas de composante transversale

À l'équilibre thermodynamique

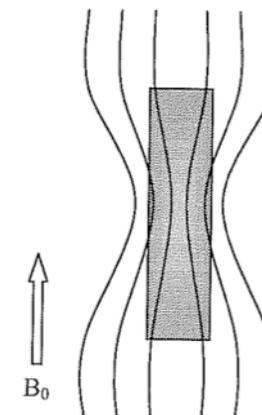
# Comportement magnétique de la matière



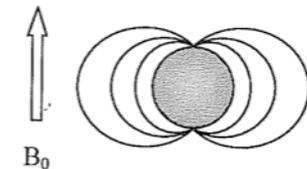
Diamagnétisme:  $\chi < 0$ ,  
Paramagnétisme:  $\chi > 0$   
Super paramagnétisme



$\chi \approx -10^{-6}$   
Diamagnétisme

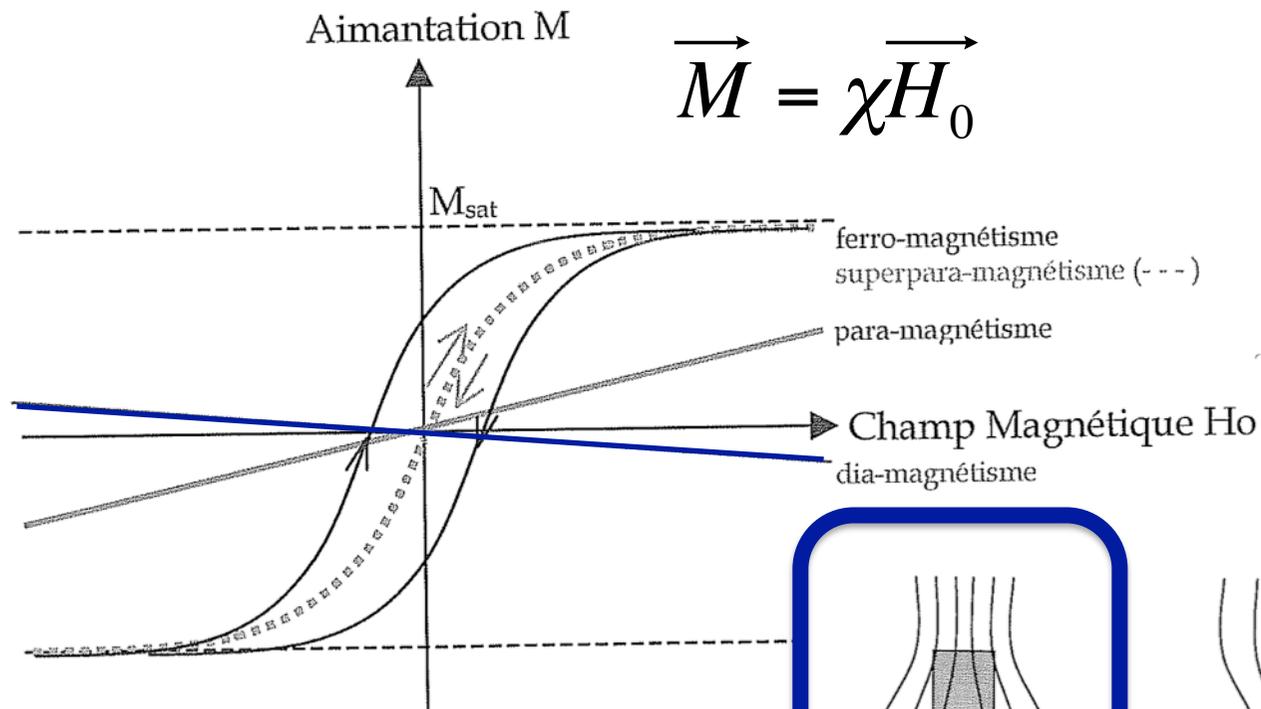


$\chi \approx +10^{-5}$  à  $10^{-3}$   
Paramagnétisme

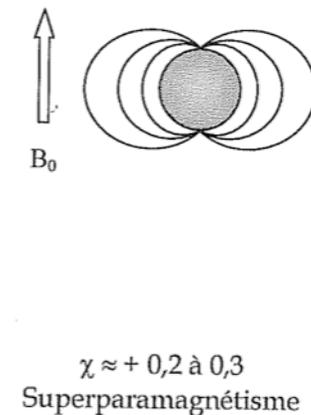
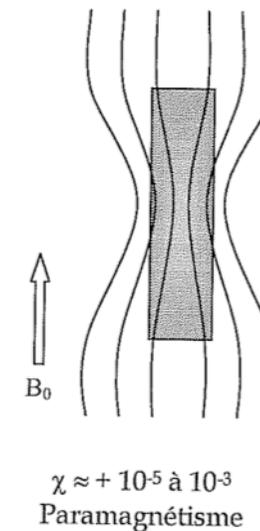
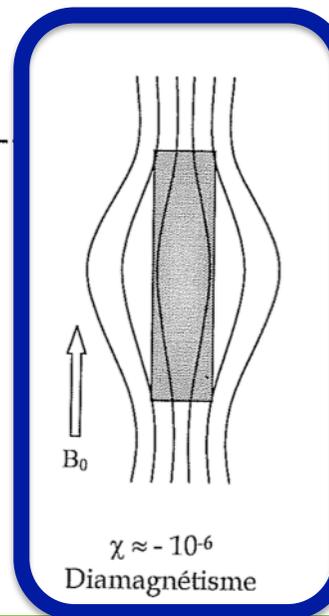


$\chi \approx +0,2$  à  $0,3$   
Superparamagnétisme

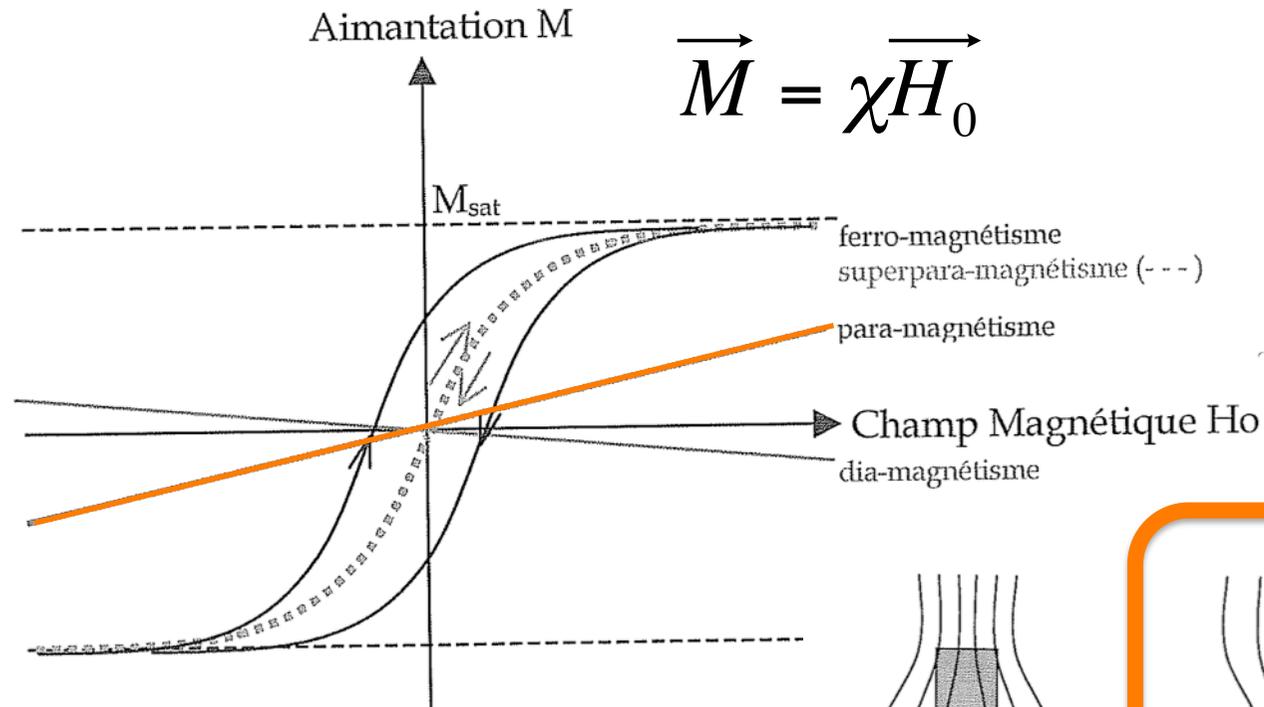
# Comportement magnétique de la matière



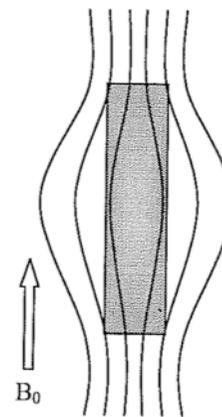
Diamagnétisme:  $\chi < 0$ ,  
Paramagnétisme:  $\chi > 0$   
Super paramagnétisme



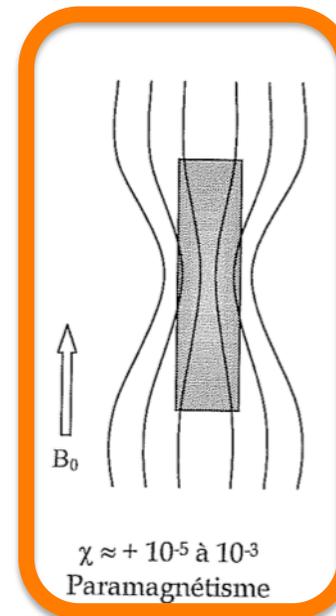
# Comportement magnétique de la matière



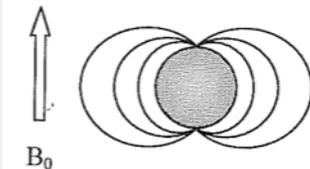
Diamagnétisme:  $\chi < 0$ ,  
Paramagnétisme:  $\chi > 0$   
Super paramagnétisme



$\chi \approx -10^{-6}$   
Diamagnétisme



$\chi \approx +10^{-5}$  à  $10^{-3}$   
Paramagnétisme



$\chi \approx +0,2$  à  $0,3$   
Superparamagnétisme

# Comportement magnétique de la matière

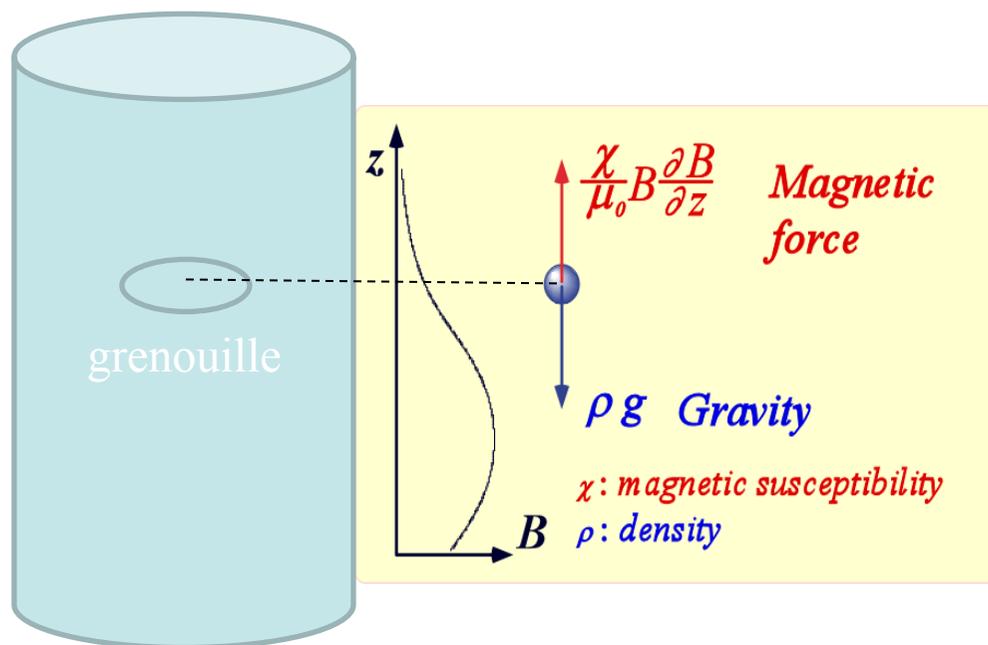
$$\vec{M} = \chi \vec{H}_0$$

Matériau	$\chi_m$	pour $T > T_c$	Types de matériaux magnétiques
Bi	$-16,6 \times 10^{-5}$		diamagnétiques ( $\chi < 0$ )
C	$-2,1 \times 10^{-5}$		
Eau	$-1,2 \times 10^{-5}$		
Cu	$-1,0 \times 10^{-5}$		
vide	0		
O <sub>2</sub>	$0,19 \times 10^{-5}$		Paramagnétiques ( $\chi > 0$ )
Al	$2,2 \times 10^{-5}$		
Co	70	1 131 °C	
Ni	110	372 °C	
Fe	200	774 °C	

# diamagnétisme



source: <http://en.wikipedia.org/wiki/Diamagnetism>



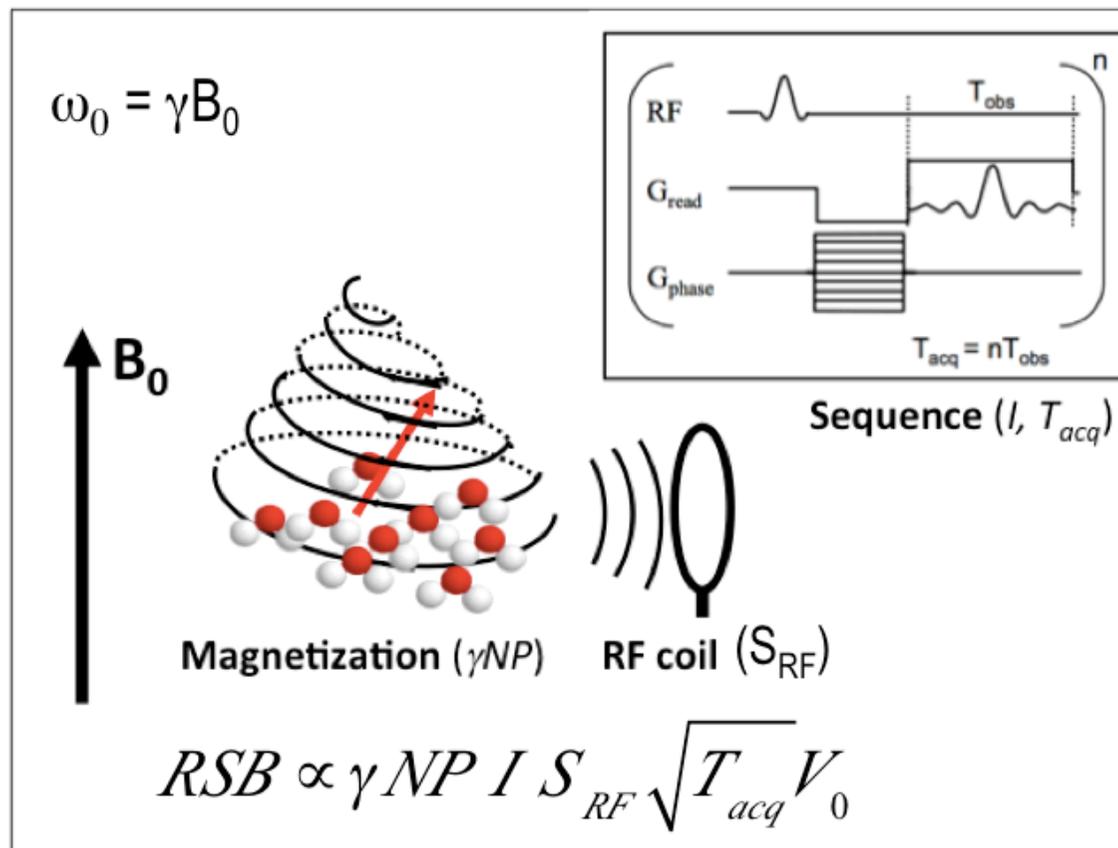
**A live frog levitates inside a 32 mm diameter vertical bore of a Bitter solenoid in a magnetic field of about 16 teslas at the Nijmegen High Field Magnet Laboratory Netherlands (André Geim, IgNobel 2000)**

André Geim and K. Novoselov  
Nobel price 2010 on graphene

# Résonance Magnétique Nucléaire en résumé

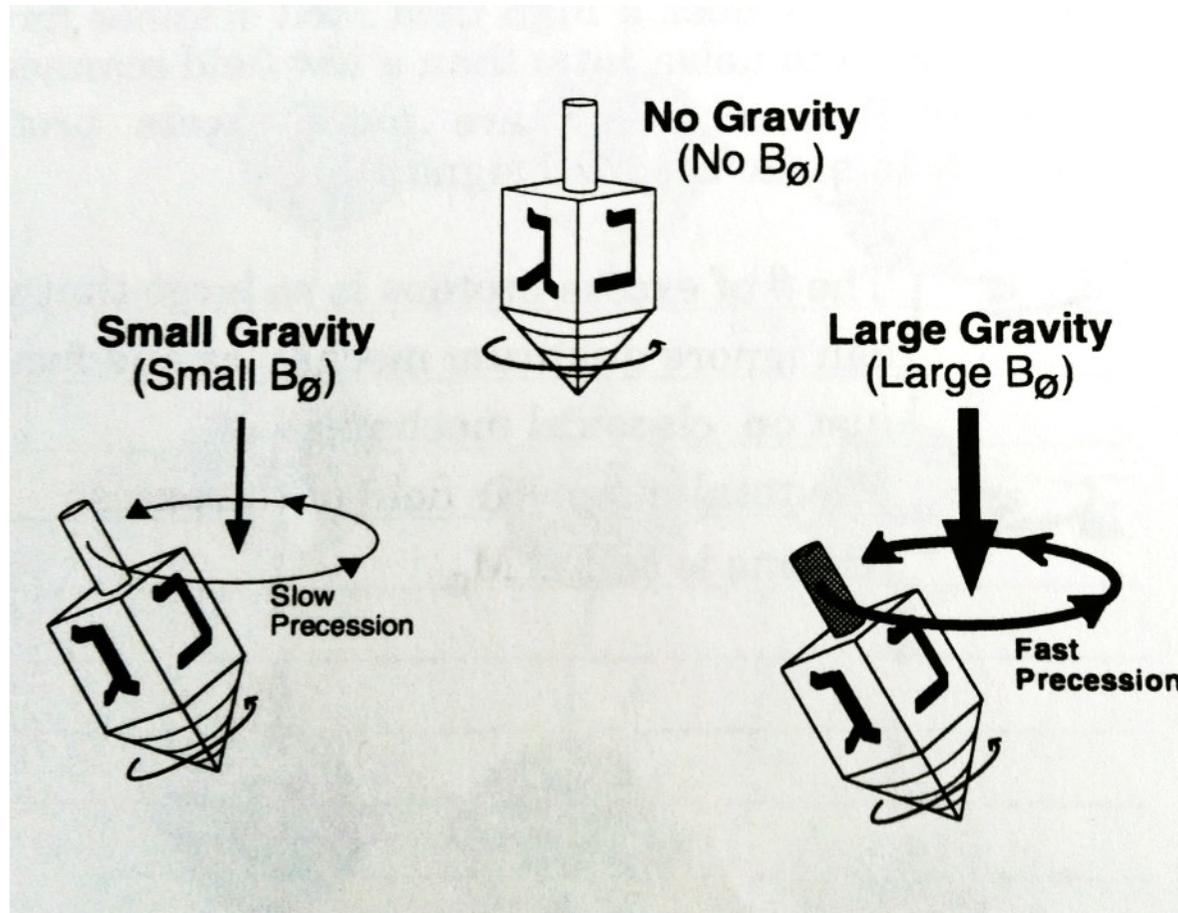
polarisation

résonance



# Quand le proton se prend pour une toupie

quand il precesse



Fréquence de Larmor

$$\omega_0 = \gamma B_0$$

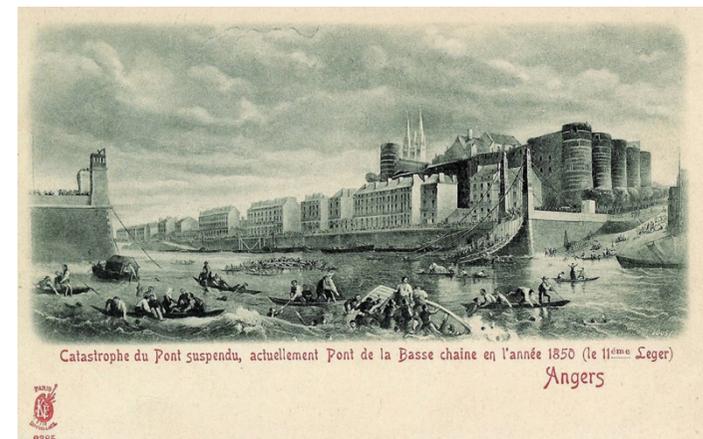
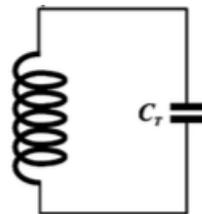
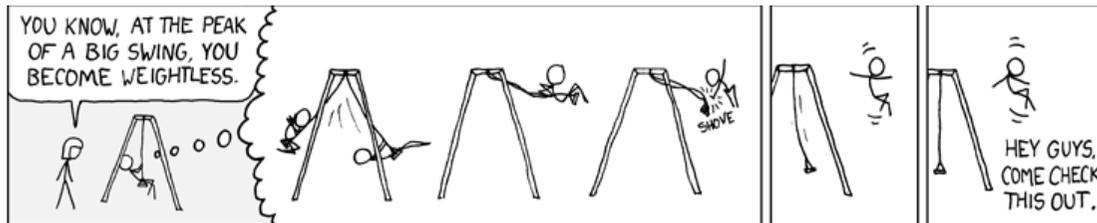
Coeff gyromagnétique  
 $\gamma^1\text{H} = 42.56 \text{ MHz/T}$

# Phénomène de résonance

Particularité d'un système de pouvoir emmagasiner temporairement de l'énergie :

- potentielle
- Cinétique

L'oscillation est le phénomène par lequel l'énergie du système passe d'une forme à l'autre, de façon périodique.



# exercice

**Un appareil à IRM a un champ magnétique principal de 2 T.**

Quelle est la fréquence de Larmor d'un proton soumis à ce champ magnétique ? On rappelle que la fréquence de précession d'un proton soumis à un champ magnétique de 1 T est de 42,57 MHz.

Quelle est la durée d'un tour complet en précession ?

# exercice

**Un appareil à IRM a un champ magnétique principal de 2 T.**

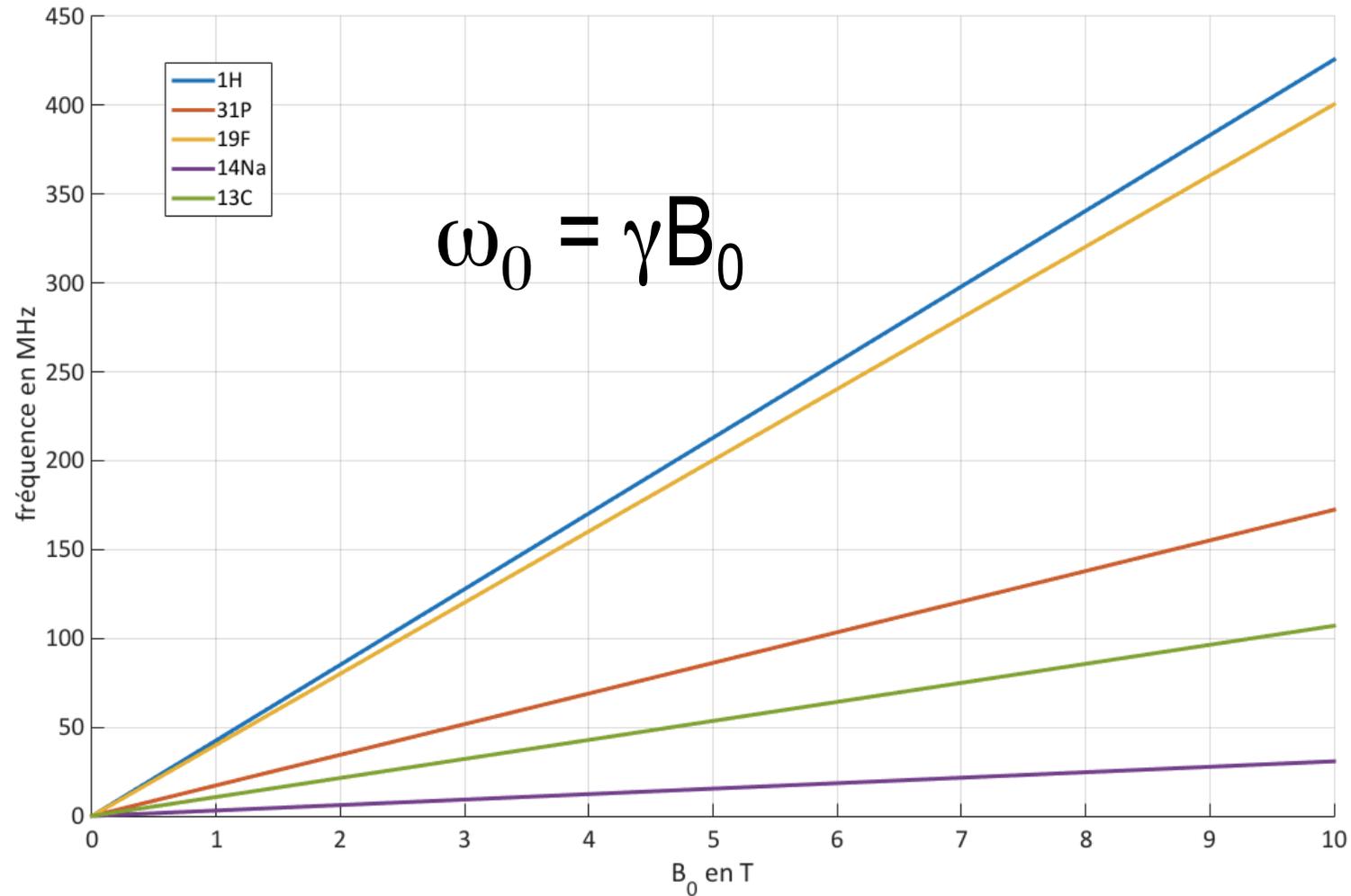
Quelle est la fréquence de Larmor d'un proton soumis à ce champ magnétique ? On rappelle que la fréquence de précession d'un proton soumis à un champ magnétique de 1 T est de 42,57 MHz.

$$F_0 = 85,14 \text{ MHz}$$

Quelle est la durée d'un tour complet en précession ?

$$85,14 \cdot 10^6 \text{ tours/sec} \rightarrow 1 \text{ tour dure } 1/85,14 \cdot 10^6 = 11,74 \text{ } \mu\text{sec}$$

# Larmor equation



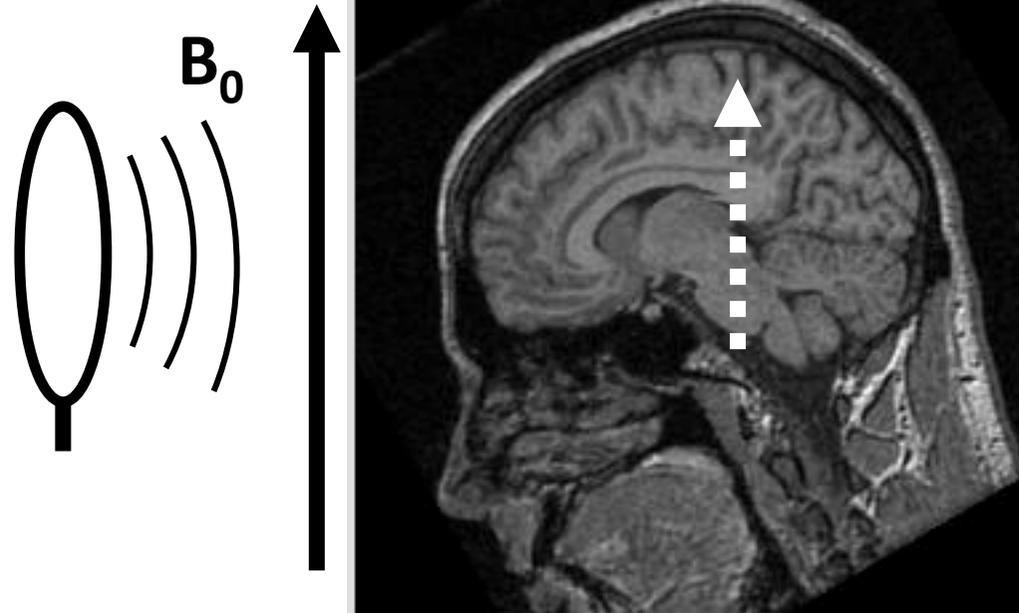
# Description de la RMN

Aimantation à l'équilibre est de très faible amplitude

- Sortir le système hors de son état d'équilibre pour pouvoir détecter un signal (**excitation des spins**)
- Pour cela on applique une **impulsion RF** (champ  $B_1$  intense, perpendiculaire à  $B_0$  et de fréquence  $\nu_1$ ) pendant un temps très court.
- Cette impulsion RF doit respecter la condition de résonance:  $\omega_1 = \omega_0$ .

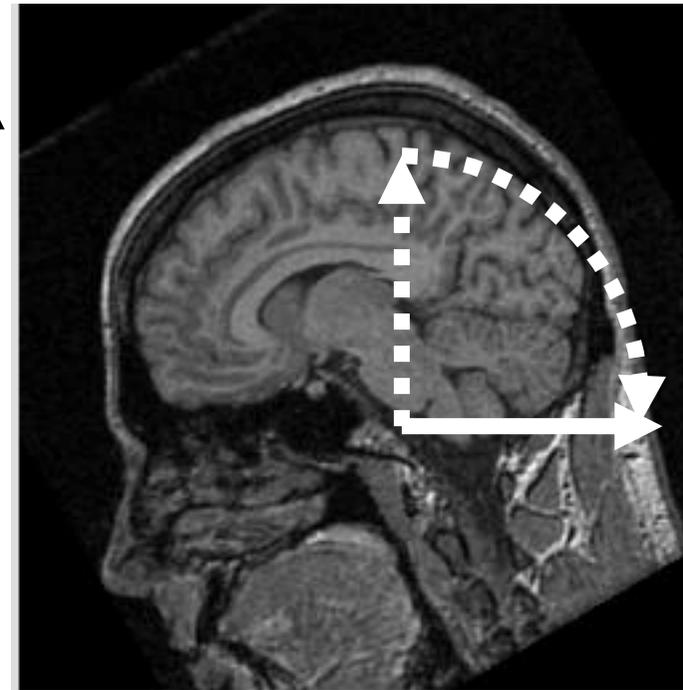
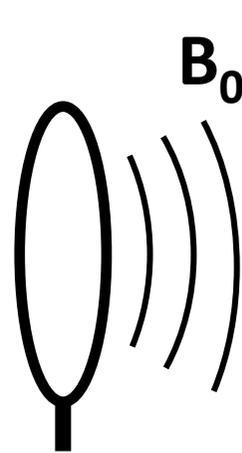
# Excitation des spins

champ  $B_1$  RF intense,  
perpendiculaire à  $B_0$  et de  
fréquence  $\omega_1$



# Excitation des spins

champ  $B_1$  RF intense,  
perpendiculaire à  $B_0$  et de  
fréquence  $\omega_1 = \omega_0$



$M_{xy}$

$M$  bascule alors d'un angle  $\alpha = \gamma B_1 \tau$ ,  $\tau$  durée de l'impulsion RF

# Impulsion RF

- Quelle devra être l'amplitude de  $B_1$  pour obtenir un pulse de  $90^\circ$  en  $100 \mu\text{s}$ , pour l'IRM de noyaux d'  $^1\text{H}$  à  $1,5 \text{ T}$ ?
- Quel serait l'angle si ce pulse avait une durée deux fois plus longue?

# Impulsion RF

- Quelle devra être l'amplitude de  $B_1$  pour obtenir un pulse de  $90^\circ$  en  $100 \mu\text{s}$ , pour l'IRM de noyaux d'  $^1\text{H}$  à  $1,5 \text{ T}$ ?
- Quel serait l'angle si ce pulse avait une durée deux fois plus longue?

$$B_1 = \frac{\alpha}{\gamma\tau}$$

$$B_1 = \frac{\pi/2}{2\pi \times 42.58 \times 10^6 \times 100 \times 10^{-6}} = 59 \mu\text{T}$$

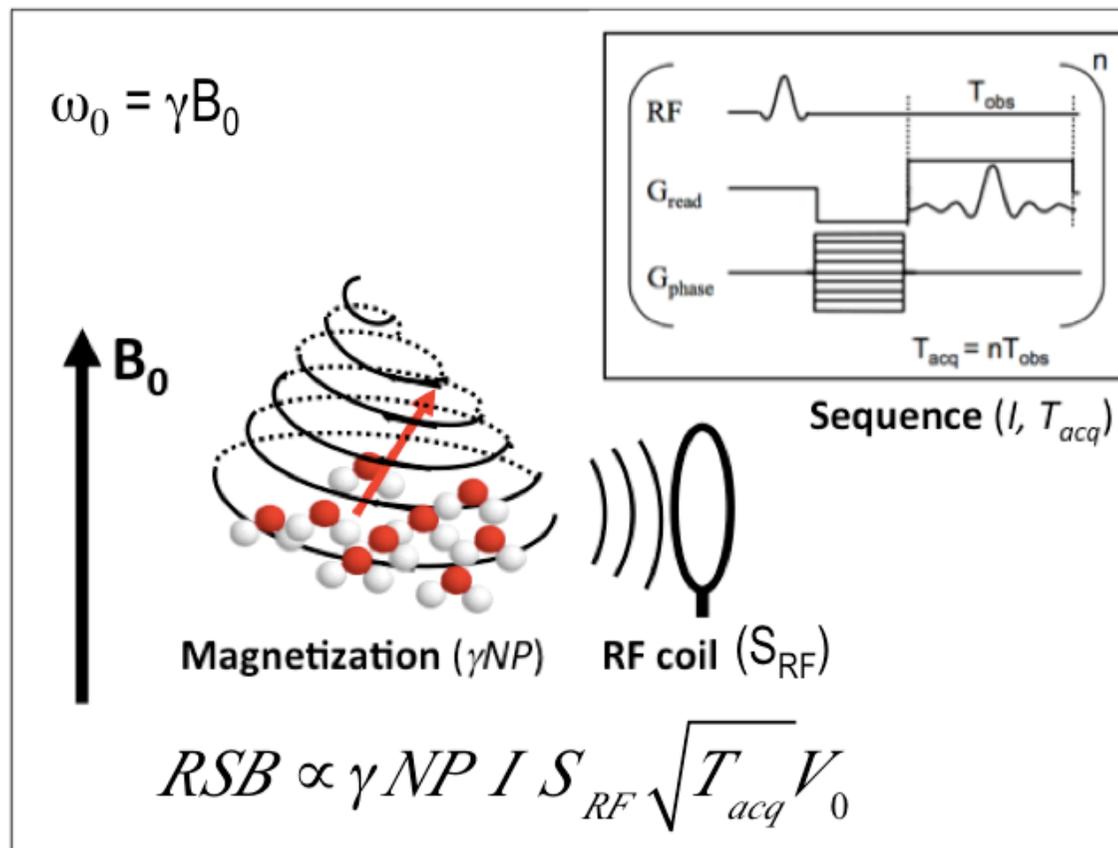
$$B_1 = \pi$$

# Résonance Magnétique Nucléaire en résumé

polarisation

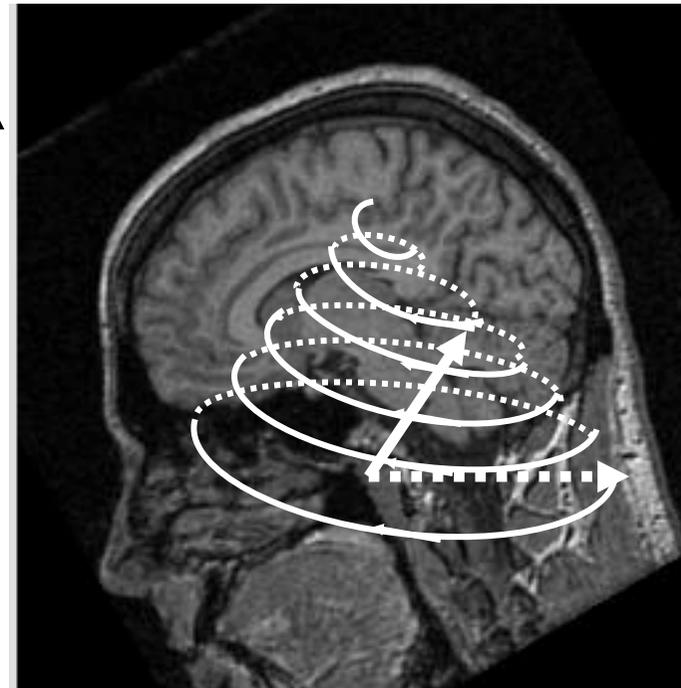
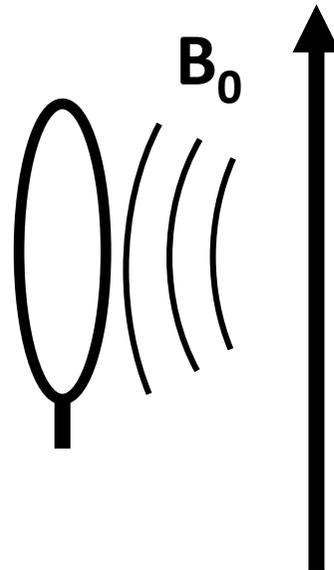
résonance

relaxation



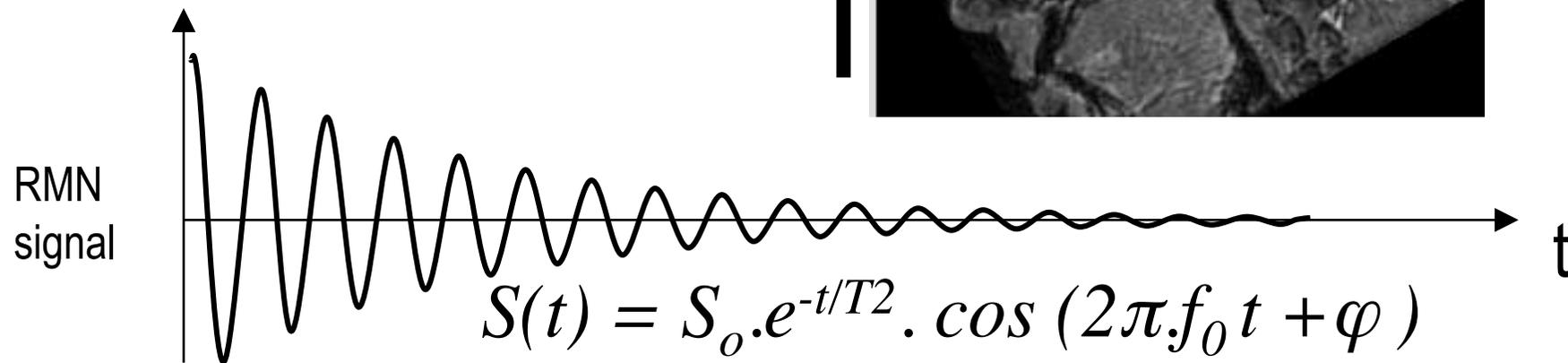
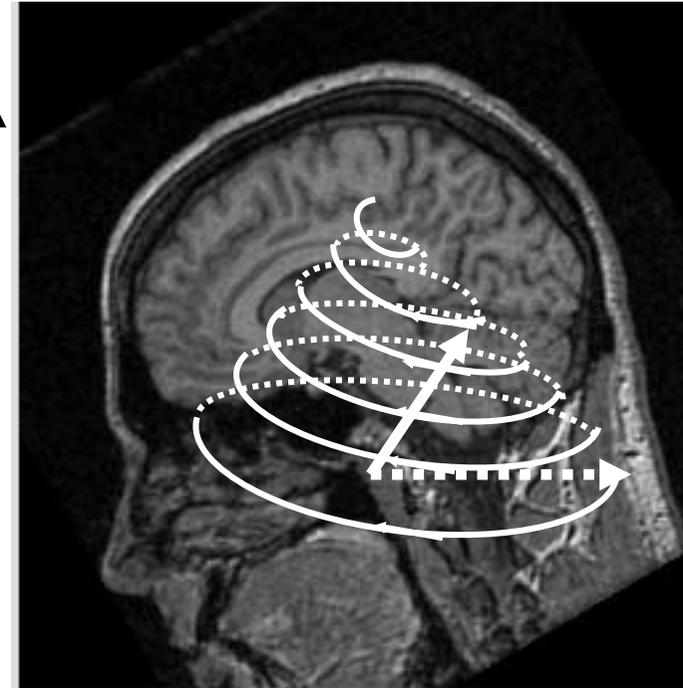
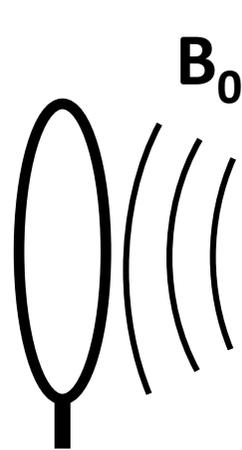
# Précession libre et relaxation

$$\omega_0 = \gamma B_0$$



# Précession libre et relaxation

$$\omega_0 = \gamma B_0$$



# Description de l'aimantation

Évolution de l'aimantation  $M$  dans un champ magnétique  $B_{\text{eff}}$

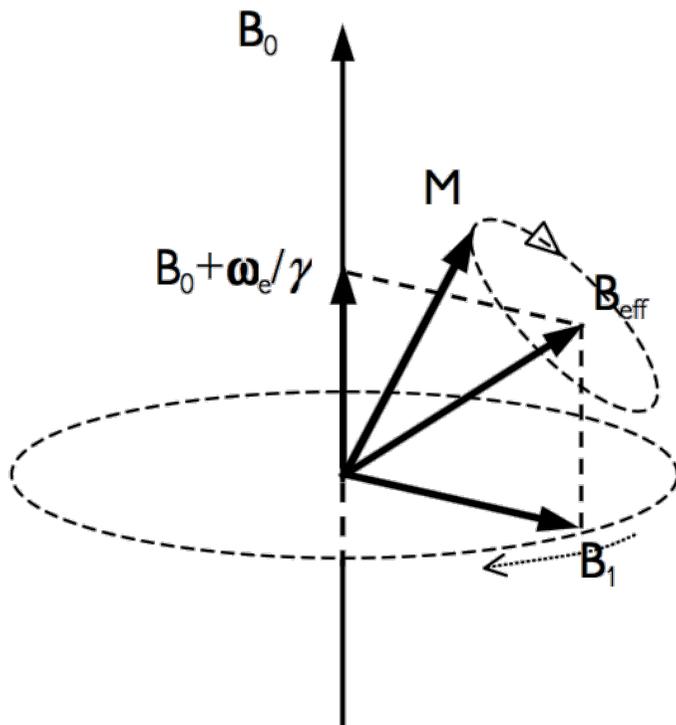
Équations de Bloch

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma \vec{M} \wedge \vec{B}_{\text{eff}}$$

$B_0$  Champ magnétique statique

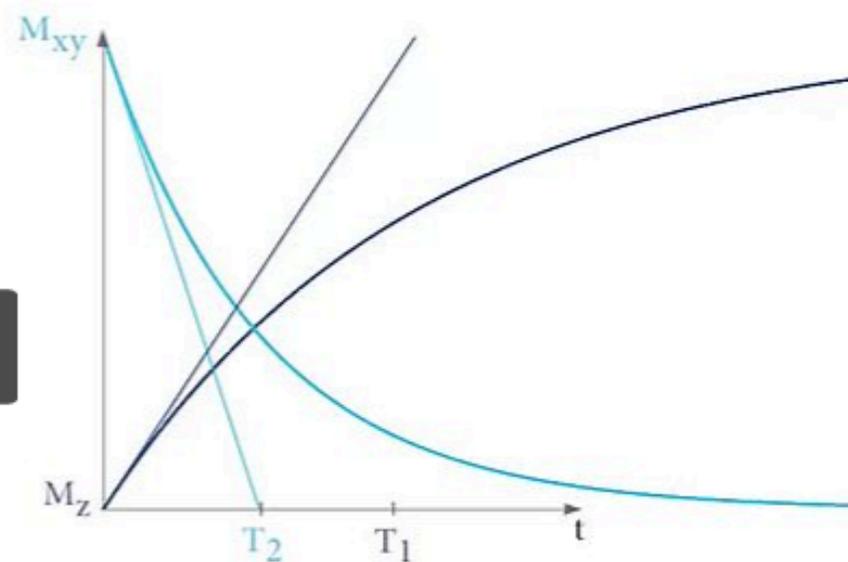
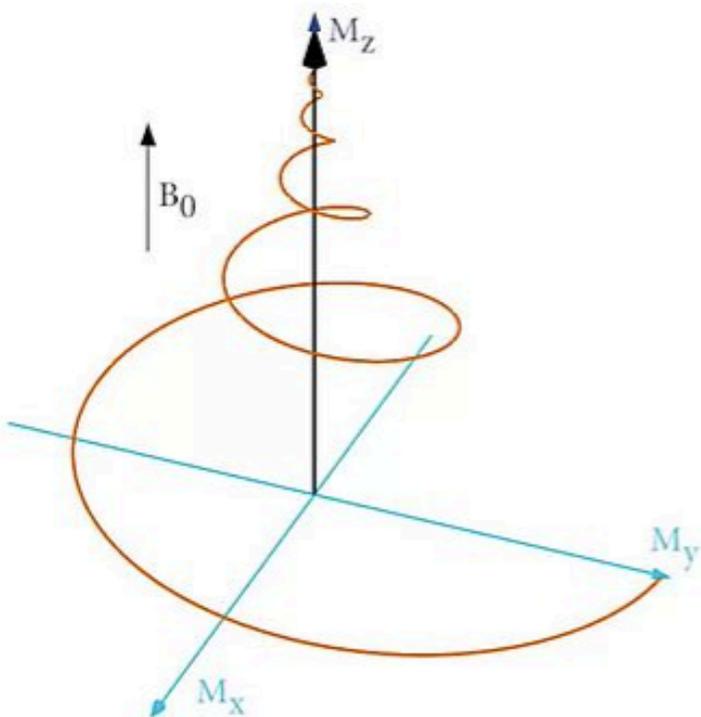
$M$  Aimantation macroscopique

$B_1$  Champ de radiofréquence

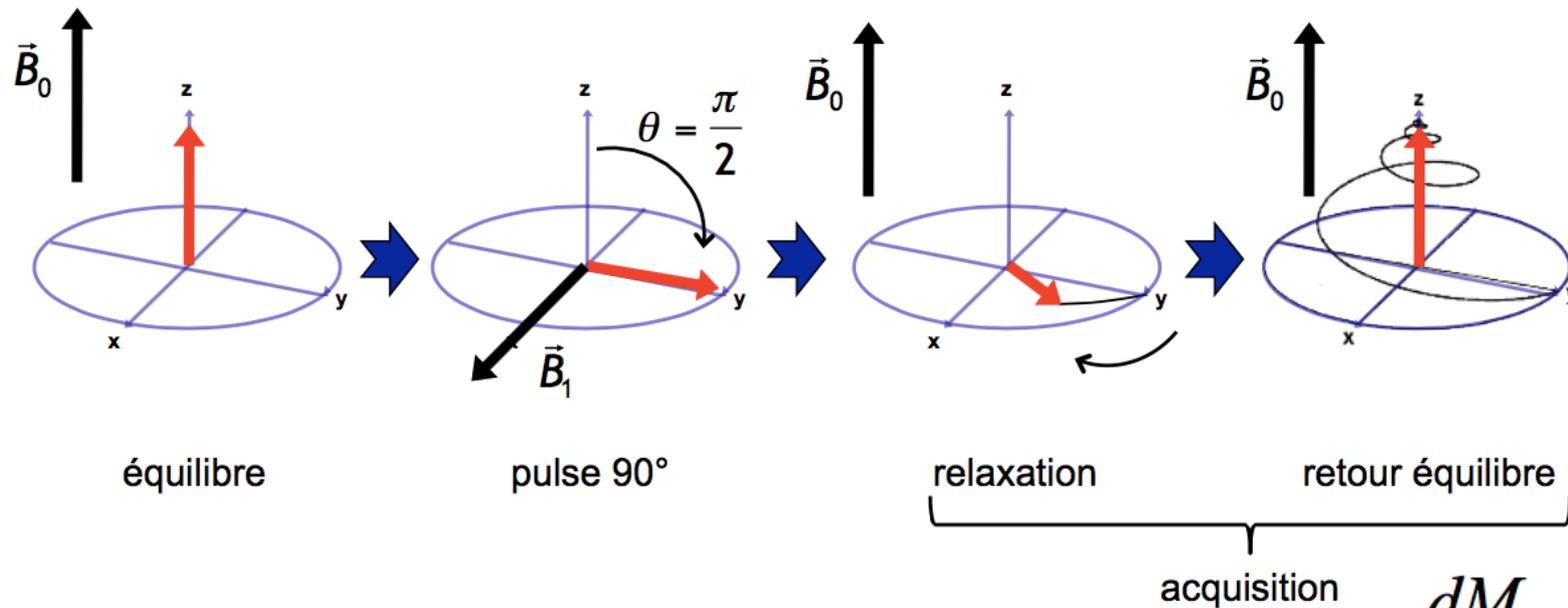


NB: si  $B_{\text{eff}} = B_0$   $M$  précesse autour de  $B_0$

Proton\_spin\_MRI.webm



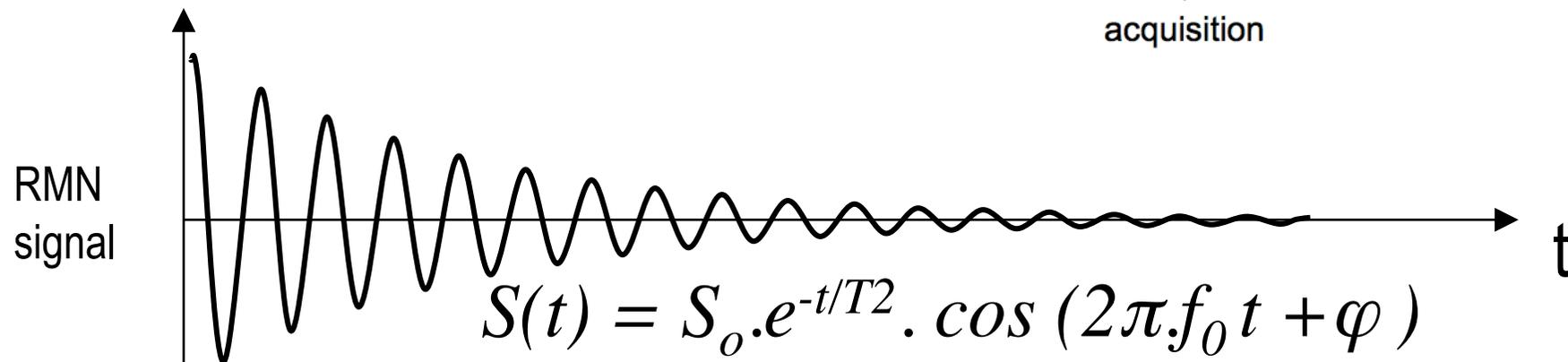
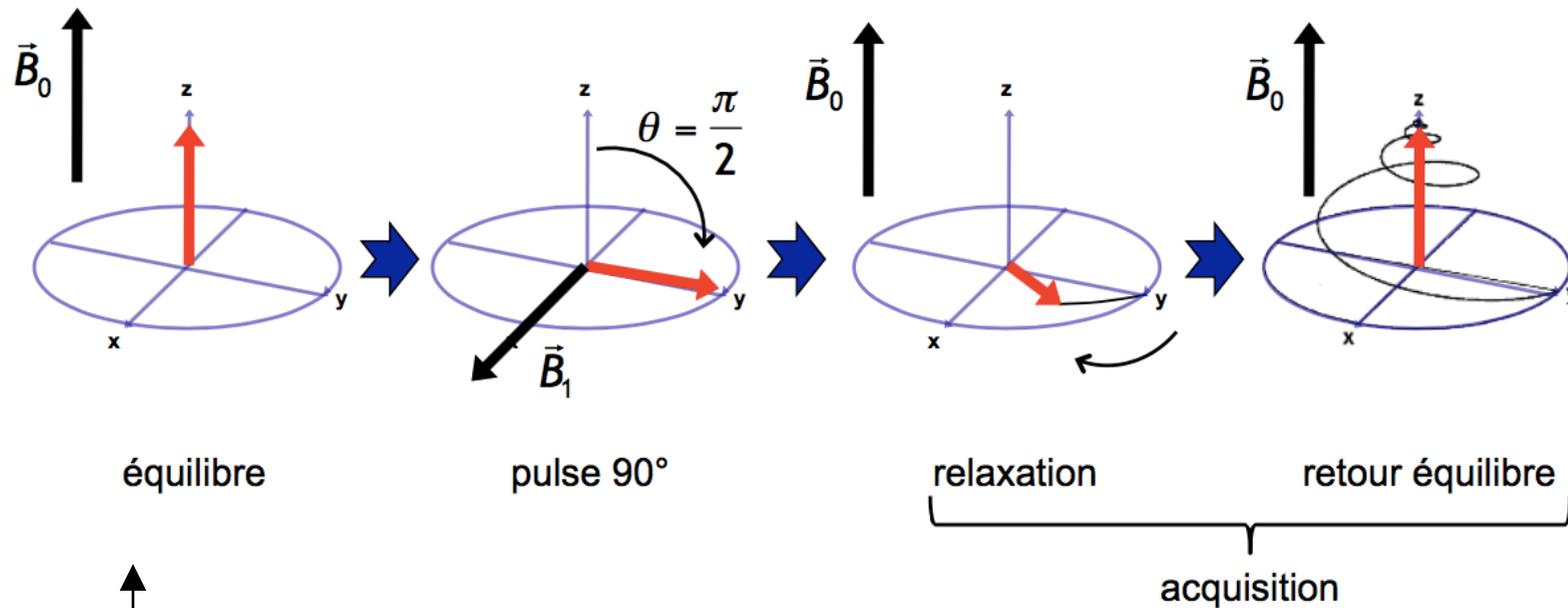
# Plan transverse - Free Induction Decay FID



$$\frac{dM_x}{dt} = -\frac{M_x}{T_2}$$

$$\frac{dM_y}{dt} = -\frac{M_y}{T_2}$$

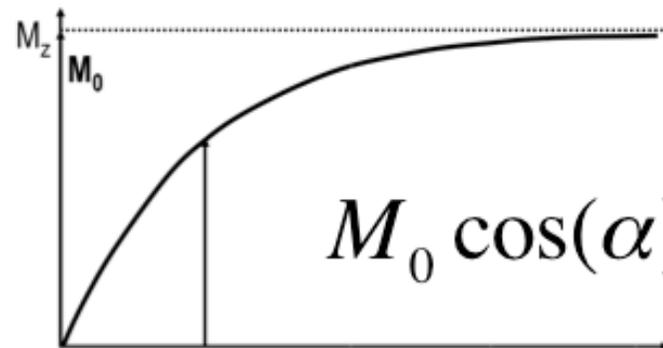
# Plan transverse - Free Induction Decay FID



# Plan longitudinal - Relaxation Longitudinale et T1

z  
↑

$$\frac{dM_z}{dt} = \frac{M_z - M_0}{T_1}$$



# Notions de relaxivité

- Pour relaxer,  $^1\text{H}$  doit rencontrer un champ magnétique fluctuant  $B_{\text{local}}$  produit par
  - Interaction dipôle-dipôle pour les noyaux en solution (électrons non appariés des radicaux libres et désoxyhémoglobine)
  - Mouvements browniens des molécules caractérisés par le temps de corrélation rotationnel  $\tau_c$  ( $\sim$  temps moyen mis par une molécule pour pivoter d'un radian)

# Relaxation T1

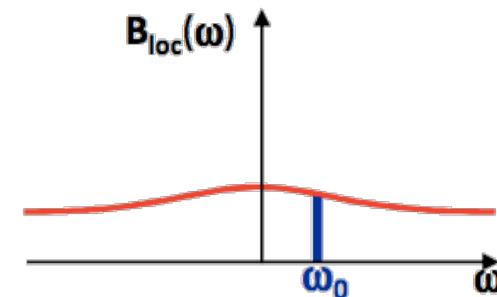
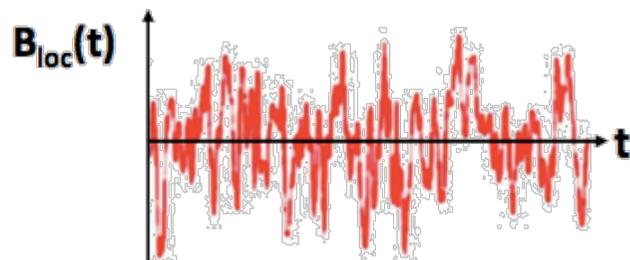
- Seul dans le vide : plus de 1000...0 ans
- Proche d'un autre proton : quelques secondes
- proche d'un électron : quelques microsecondes

# Origine de la relaxation longitudinale relaxation spin-réseau

Correspond à des échanges d'énergie entre les noyaux et leur environnement induites par les fluctuations de  $B_{\text{local}}$

Ces transitions énergétiques permettent aux spins de haute énergie ( $+1/2 \gamma \hbar B_0$ ) de céder leur énergie au réseau et de passer à un niveau d'énergie bas ( $-1/2 \gamma \hbar B_0$ ).

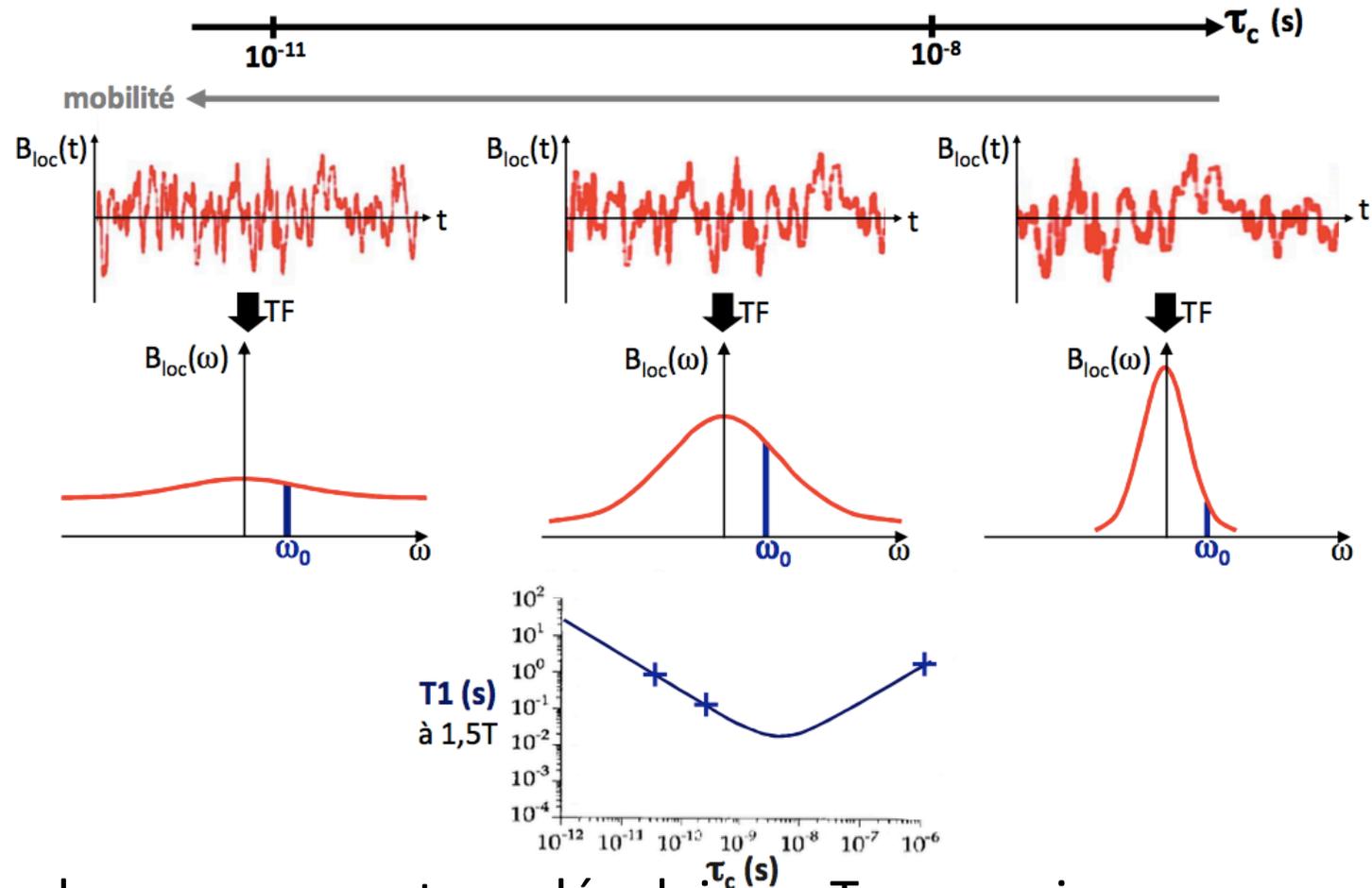
Ces échanges énergétiques ne sont possibles que si  $B_{\text{local}}$  **fluctue à la pulsation de Larmor  $\omega_0$**  ( $\gamma B_0$ ).



$T_1$  dépend de la **probabilité de transition énergétique à  $\omega_0$** , i.e de  $B_{\text{local}}(\omega_0)$ , densité de  $B_{\text{local}}$  à la pulsation  $\omega_0$ .

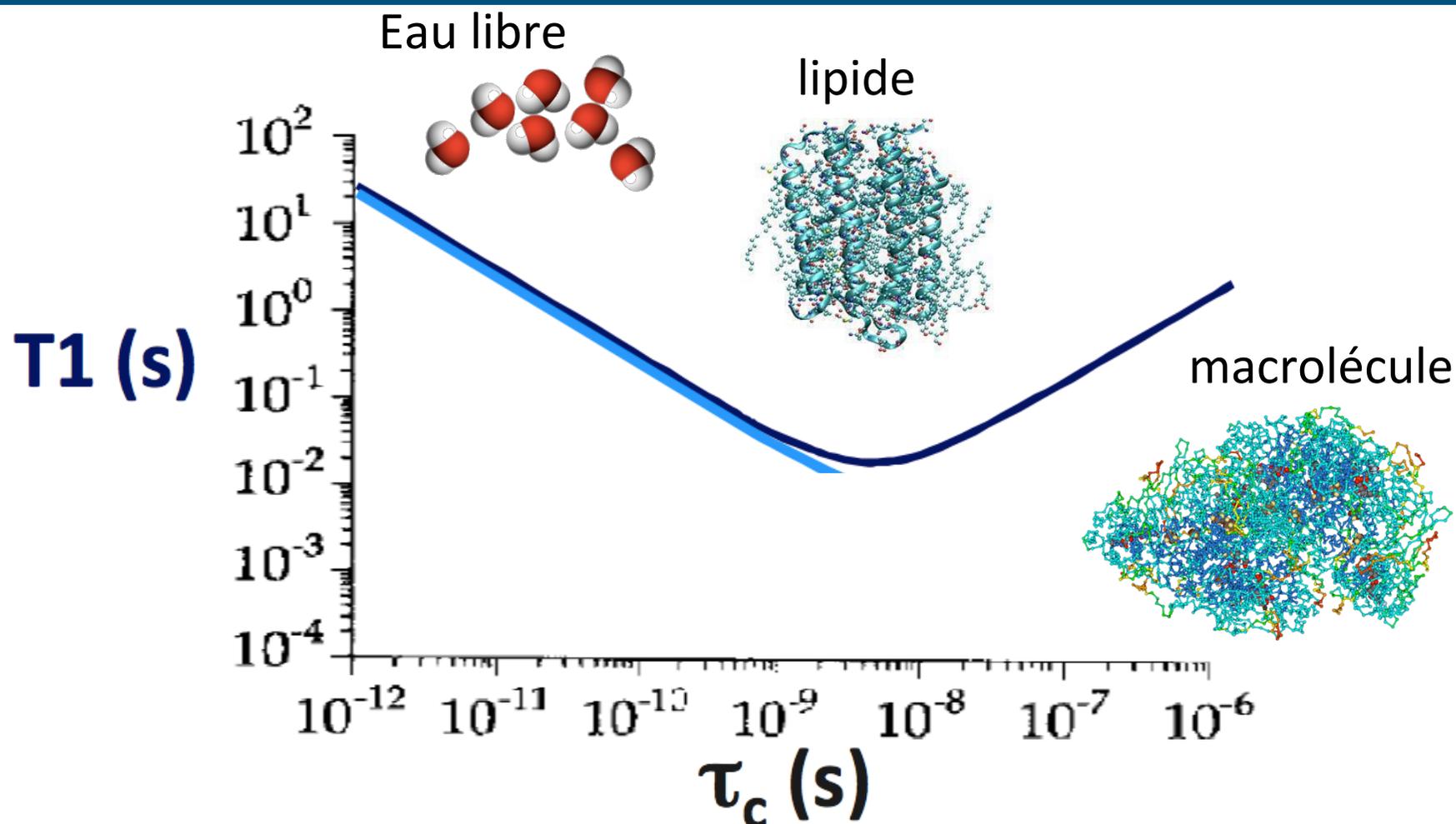
Plus  $B_{\text{local}}(\omega_0)$  est élevée, plus  $T_1$  est court

# T1 et $\tau_c$



Mesure des mouvements moléculaires : Temps mis pour une rotation d'un certain angle

# Relaxation T1 @ 1.5T



Mesure des mouvements moléculaires

Temps mis pour une rotation d'un certain angle

# Mécanisme de relaxation transversale spin-spin

Correspond à des déphasages de l'aimantation transversale induits par les fluctuations de  $B_{\text{local}}$

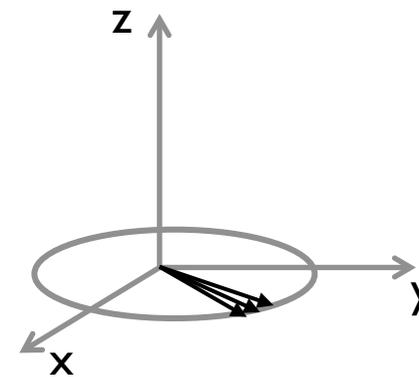
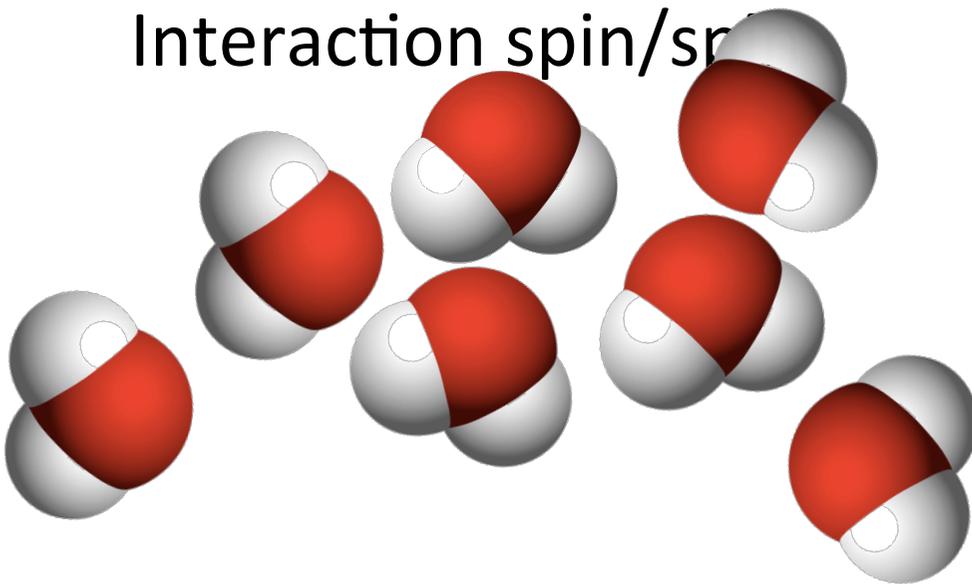
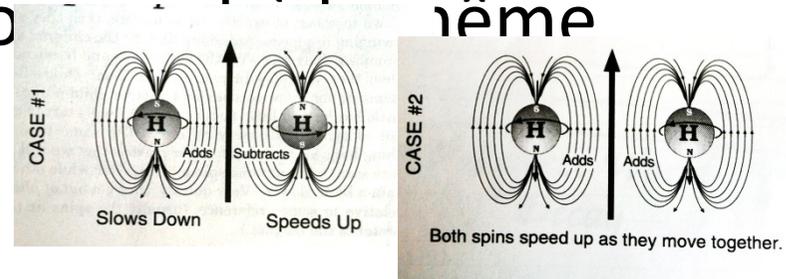
Pour les molécules très mobiles, ces déphasages s'annulent par moyennage :

- Les déphasages apparaissent quand  $\tau_c$  augmente
- T2 diminue quand  $\tau_c$  augmente

# Mécanisme de relaxation transversale spin-spin

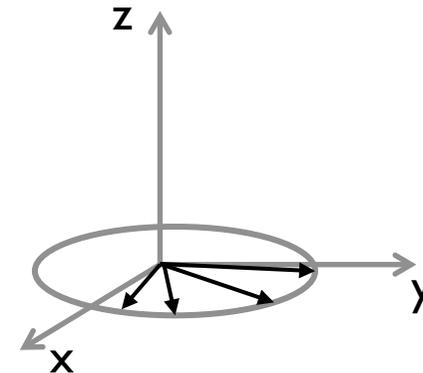
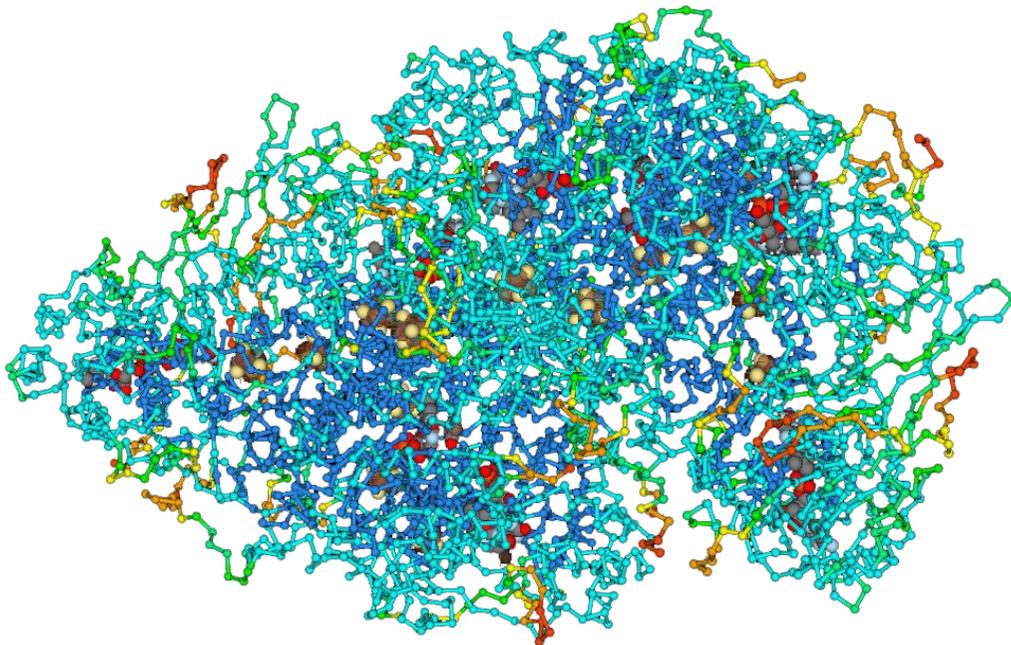
Tous les  $^1\text{H}$  voient le même environnement moyen tous les vecteurs tournent à la même fréquence

Interaction spin/spin

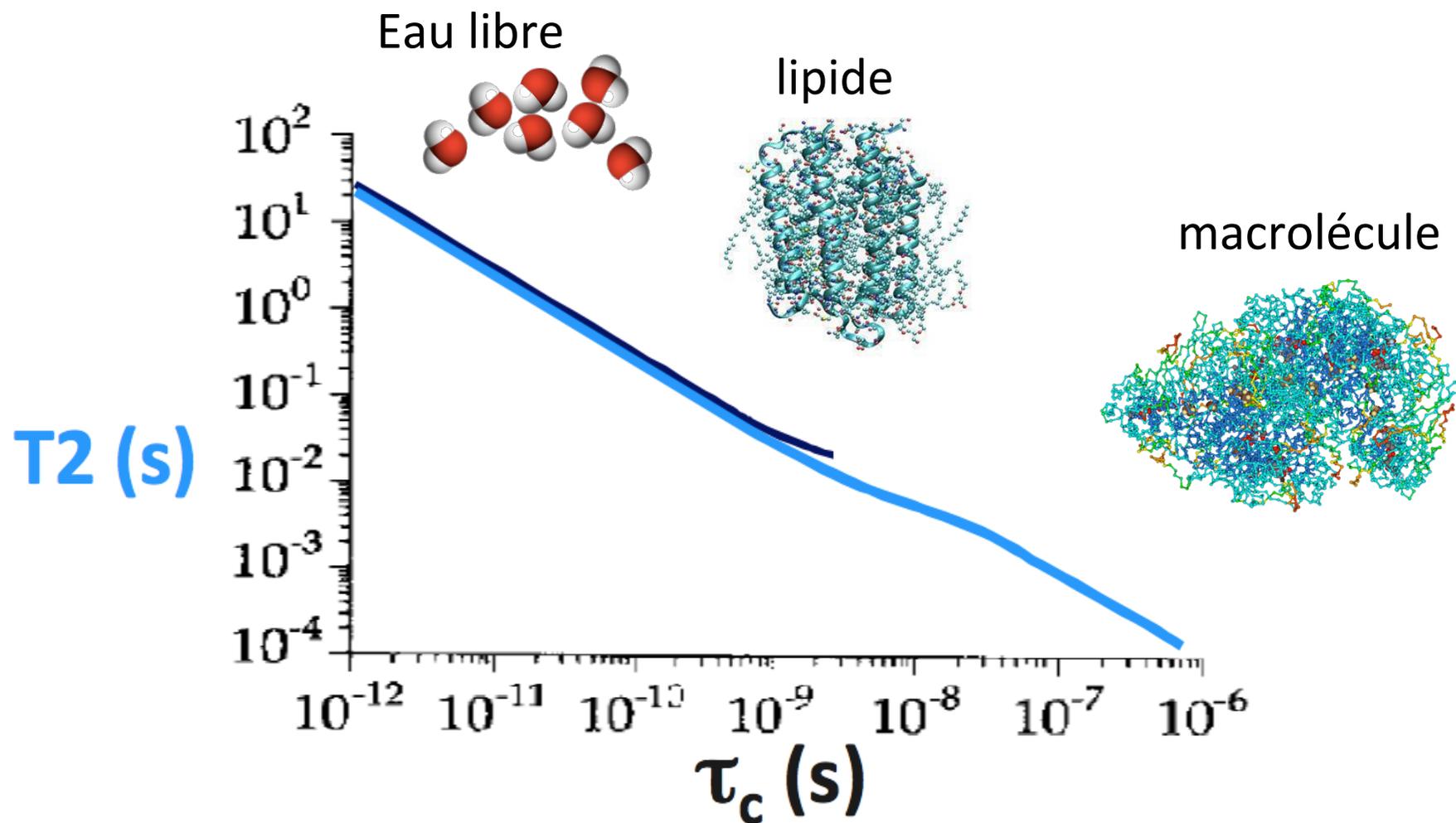


# Mécanisme de relaxation transversale spin-spin

Les  $^1\text{H}$  voient des environnements différents, il y a échanges moyen tous les vecteurs tournent à la même fréquence

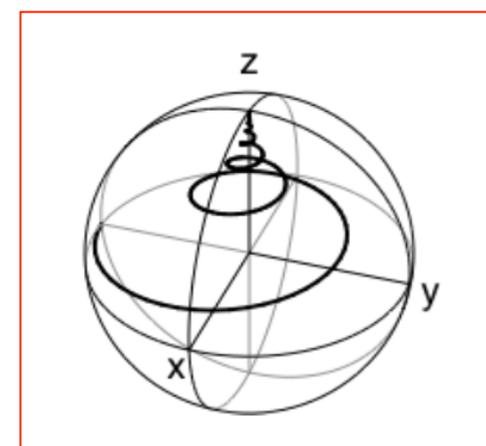
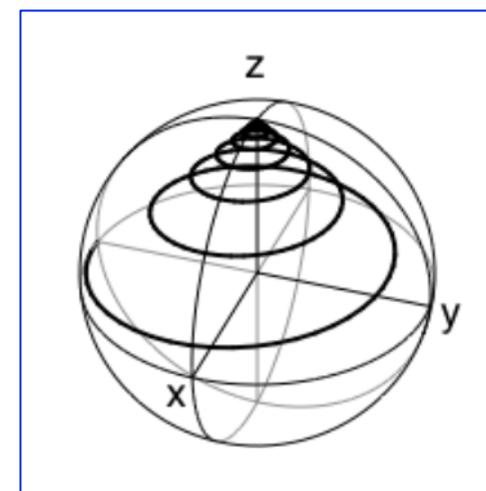


# Relaxation T2 @ 1.5T

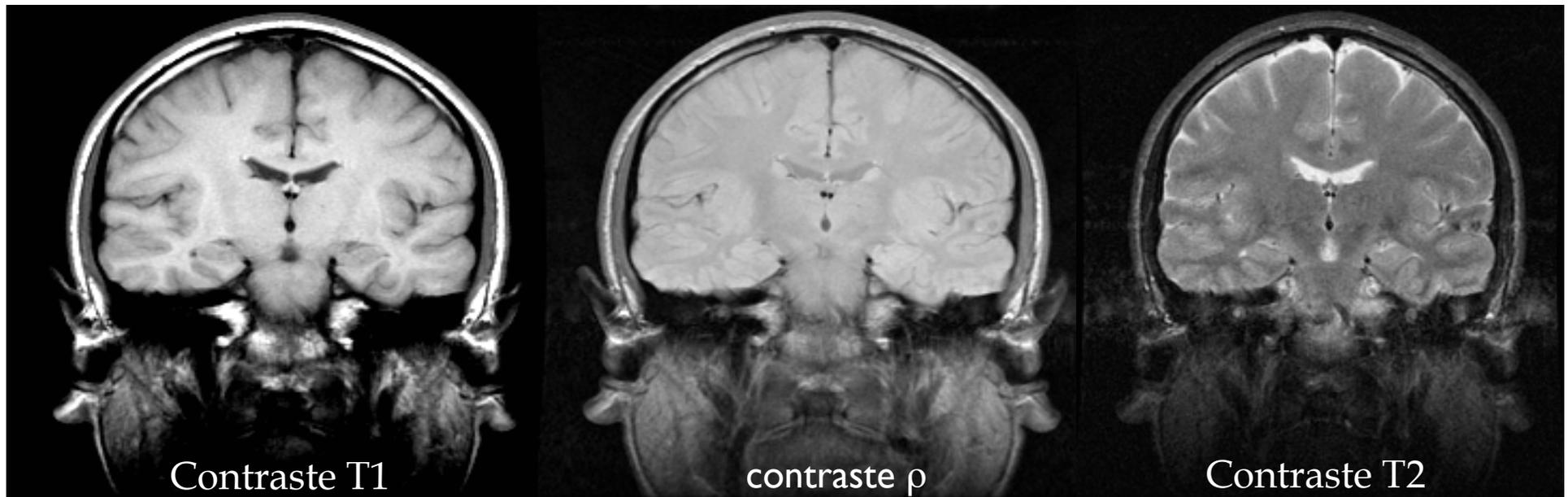


# Relaxation T1 et T2 à 1,5 T

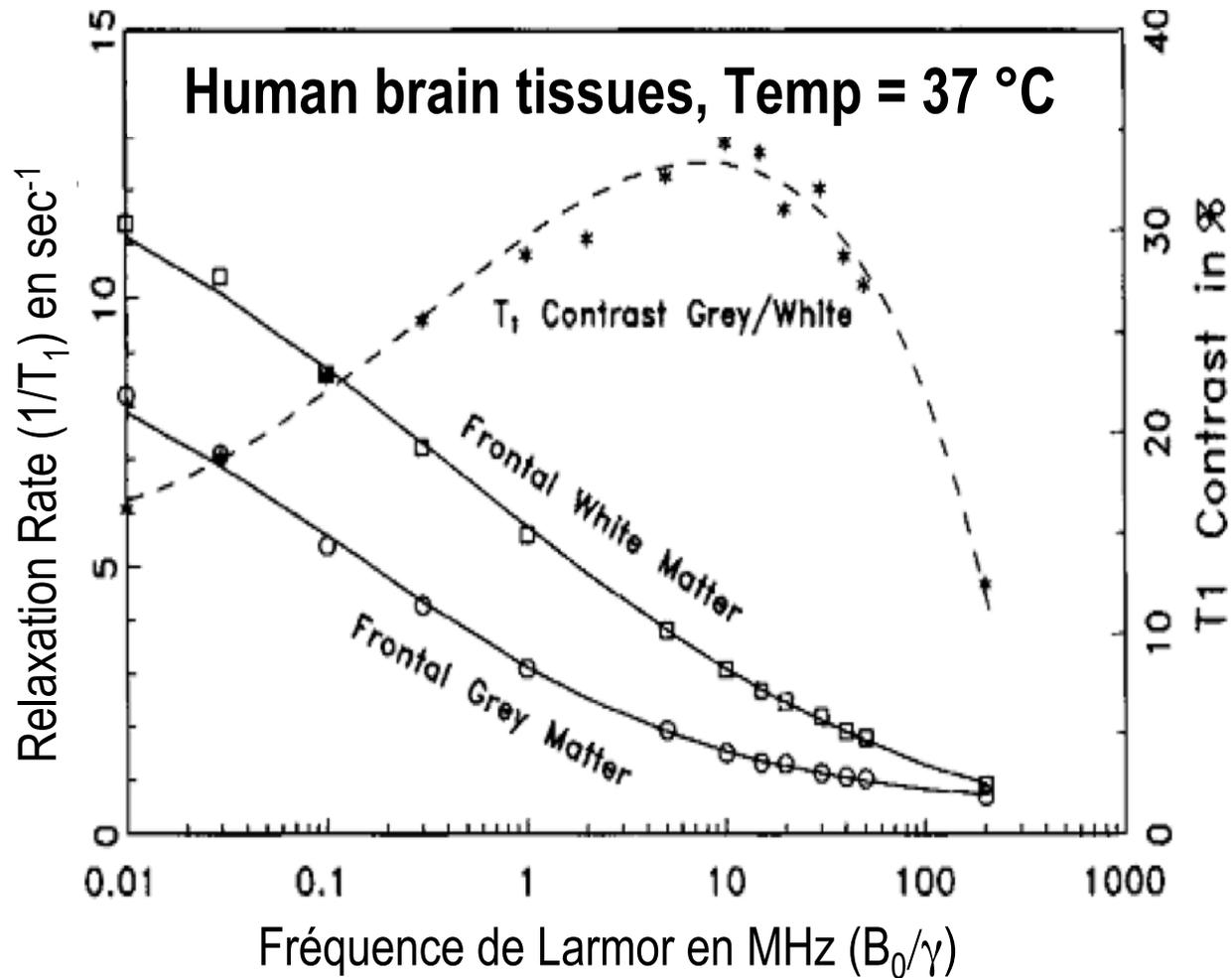
Temps de Relaxation Tissus Humains	T1	T2
Liquide Céphalo-rachidien	2500 ms	2000 ms
Substance Grise	900 ms	90 ms
Substance Blanche	750 ms	80 ms
Graisse	300 ms	40 ms



# Relaxation T1 et T2 à 1,5 T

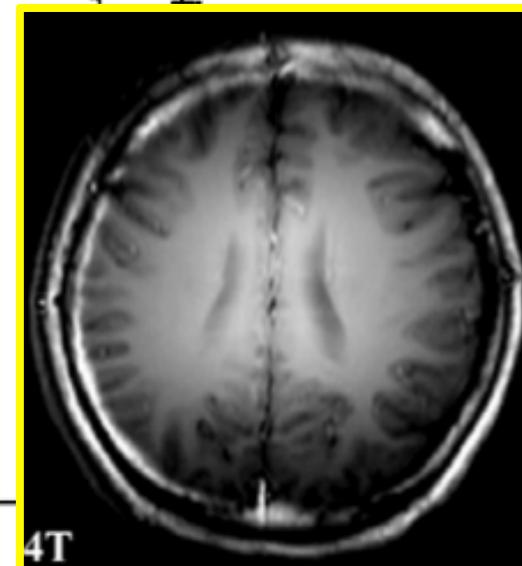
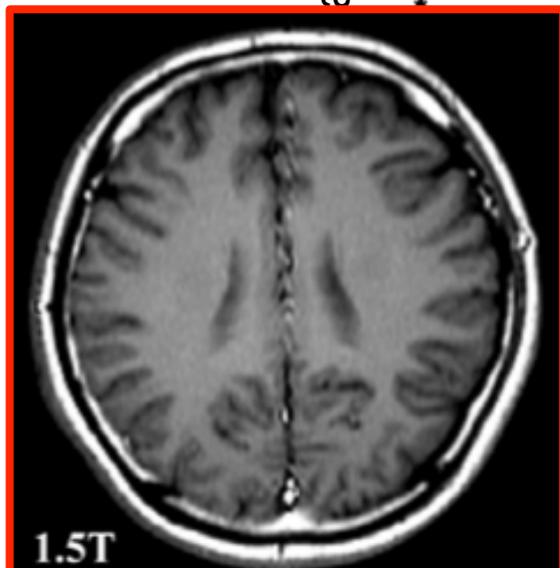
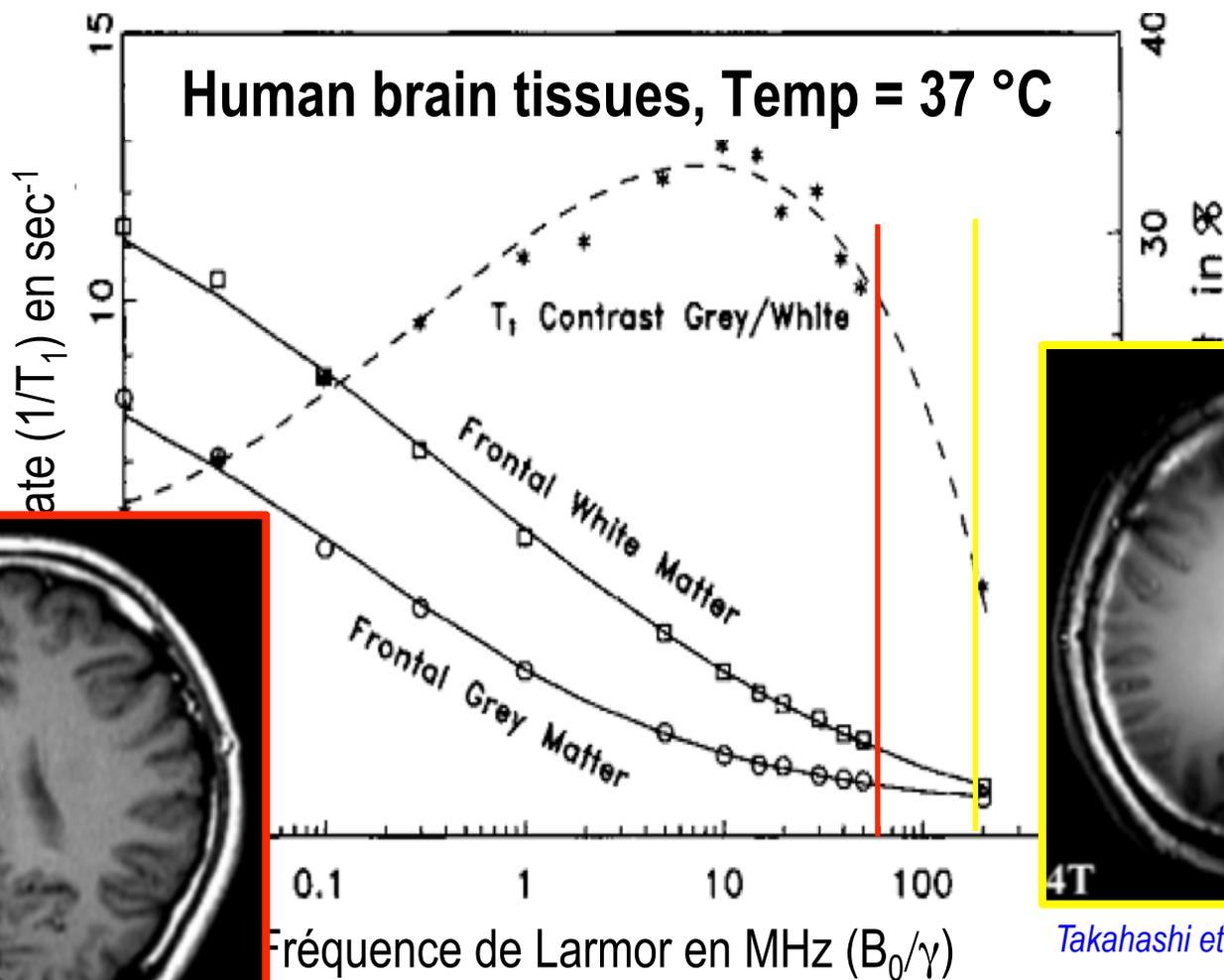


# Relaxation – intensité du champ $B_0$



Fischer et al, MRM 1990  
Cole et Cole, J. Chem. Phys. 1941

# Relaxation – intensité du champ $B_0$

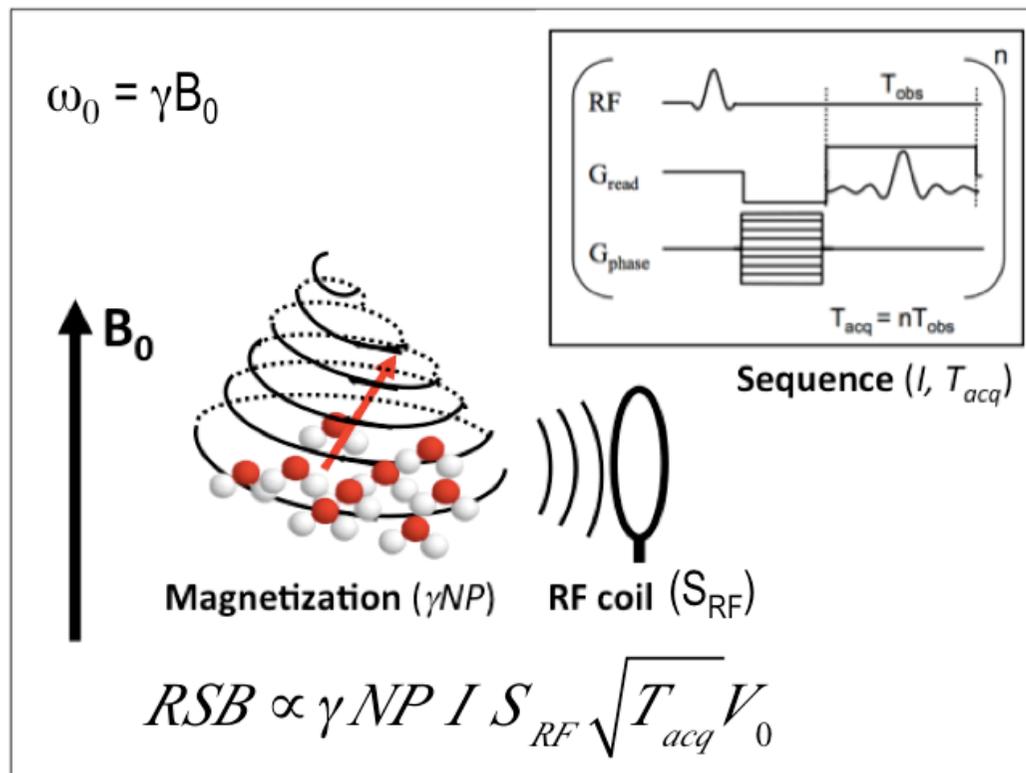


Takahashi et al, *E. J. of Radiol* 2002

Fischer et al, *MRM* 1990

Cole et Cole, *J. Chem. Phys.* 1941

# Résumé Mécanisme de relaxation



## Relaxation longitudinale ( $T_1$ )

$$M_z = M_0 \cos(\alpha) (1 - \exp(-t/T_1))$$

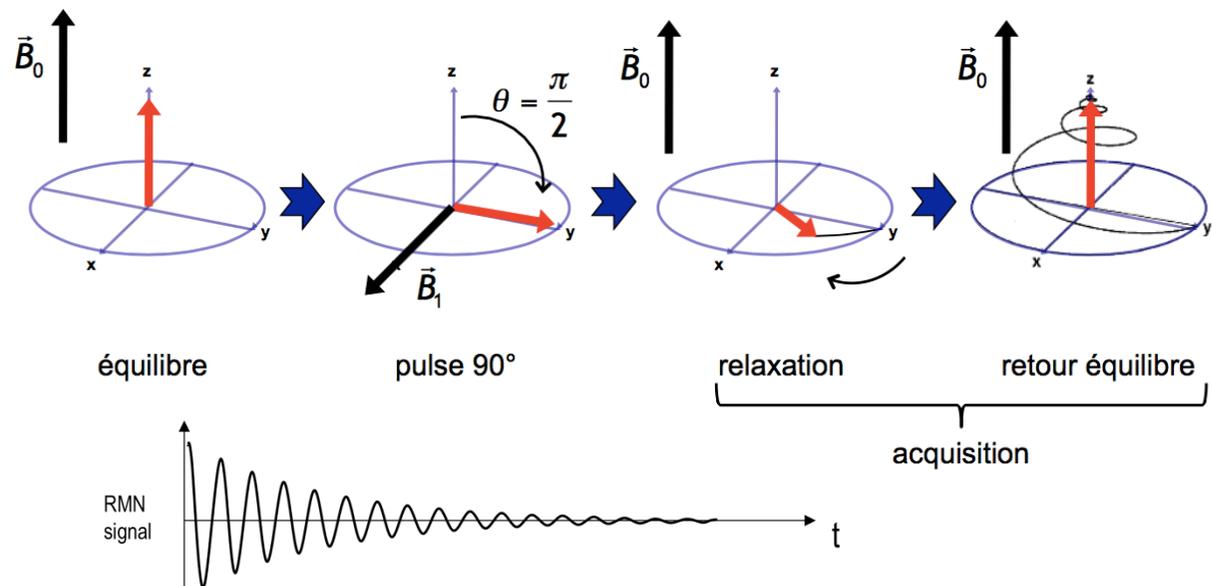
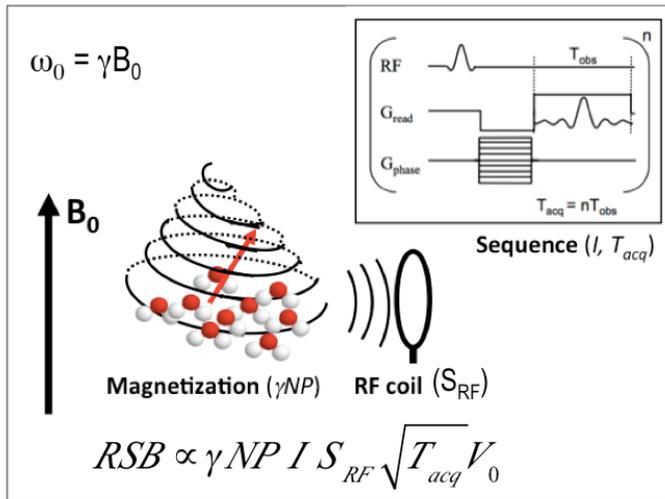
fluctuations du champs proche de la fréquence de Larmor

## Relaxation transversale ( $T_2$ )

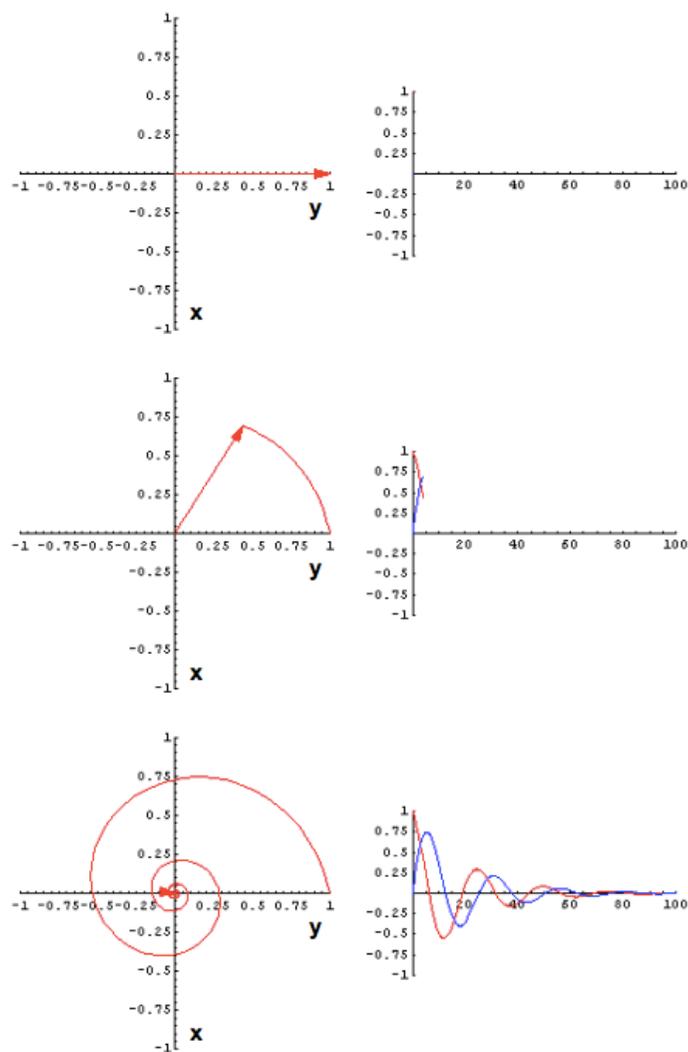
$$M_{xy} = M_0 \sin(\alpha) \exp(-t/T_2) \sin(\omega_0 t)$$

distorsion du champ magnétique

# Résonance Magnétique Nucléaire en résumé

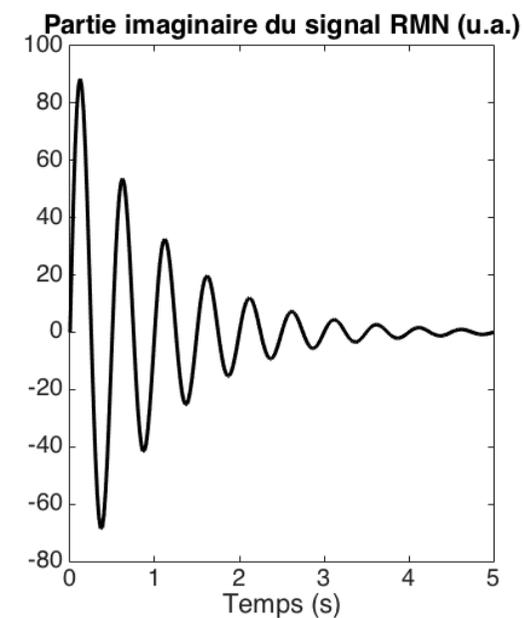
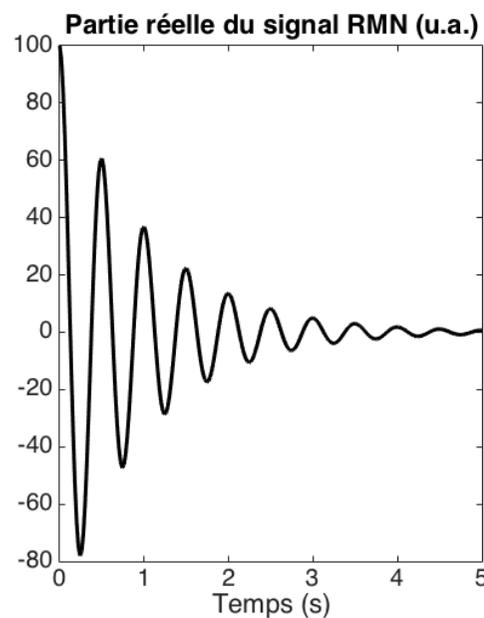
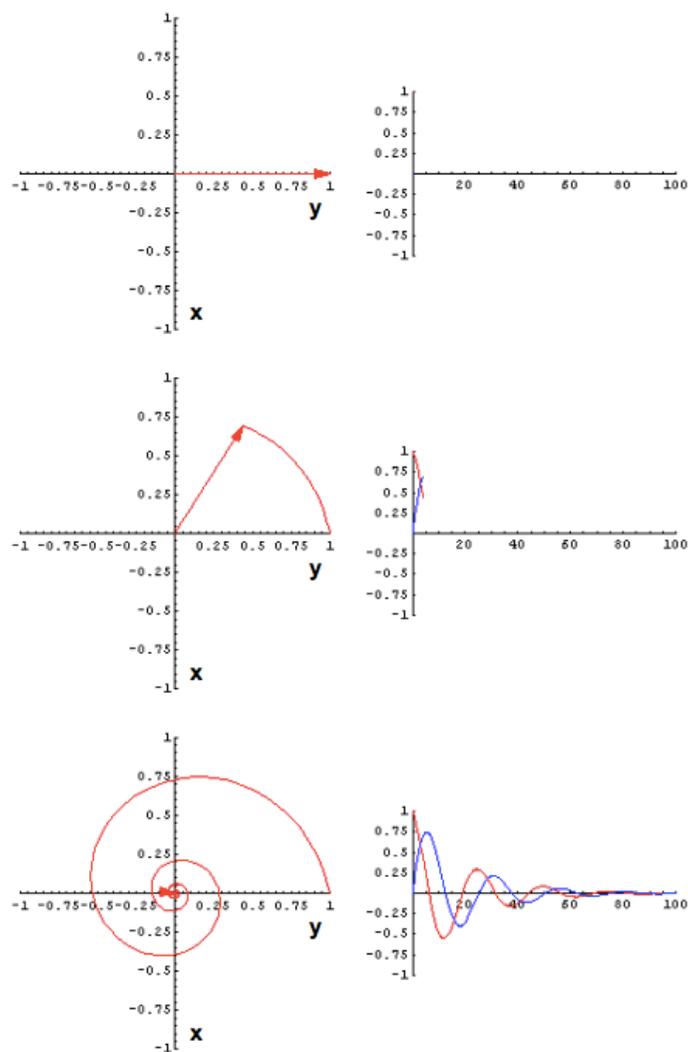


# Signal RMN



Le signal RMN est appelé **FID (Free Induction Decay)**.

# Signal RMN



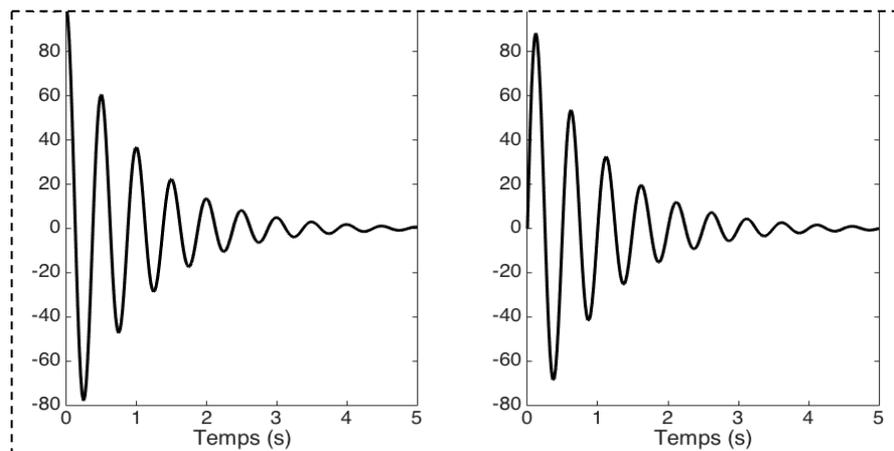
**Le signal RMN est appelé FID (Free Induction Decay).**

# Transformée de Fourier

Partie réelle

Partie imaginaire

signal RMN (u.a.)



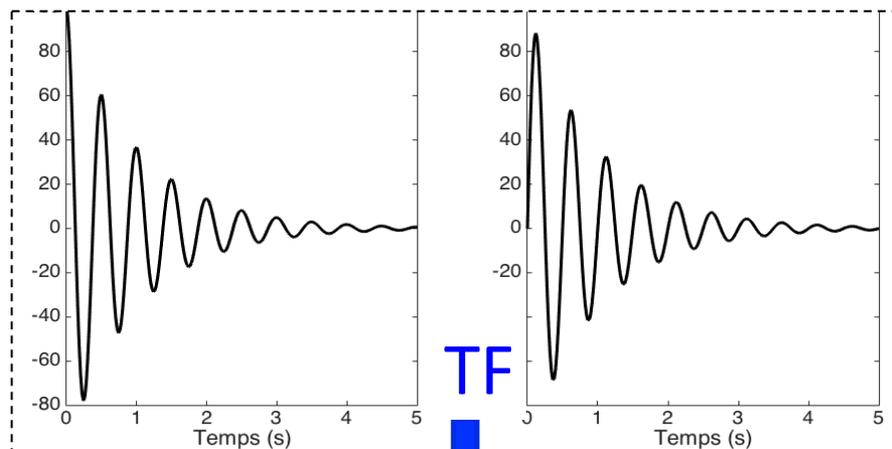
# Transformée de Fourier



Partie réelle

Partie imaginaire

signal RMN (u.a.)



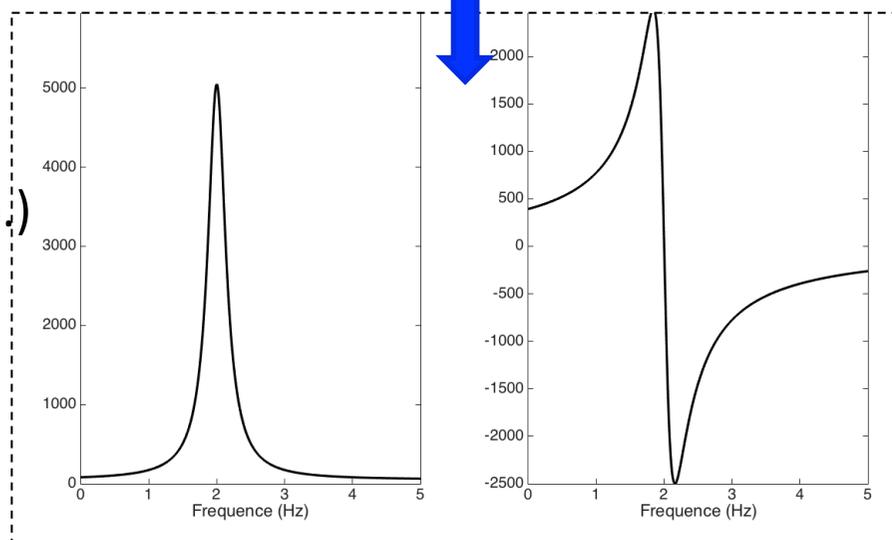
$$f(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{i\omega t} dt$$

$$e^{i\omega t} = \cos \omega t + i \sin \omega t$$

$$\text{Re}[f(\omega)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cos \omega t dt$$

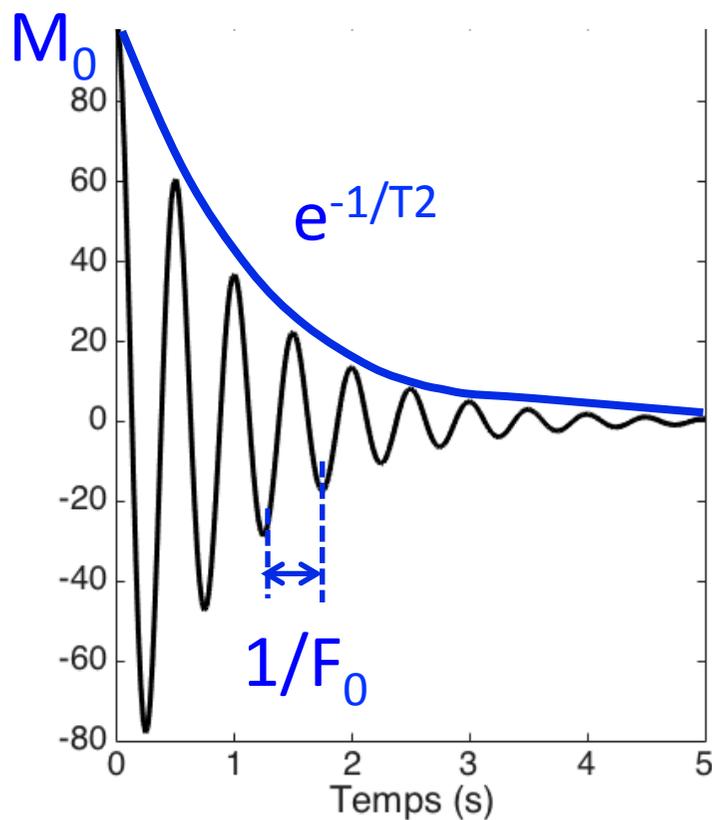
$$\text{Im}[f(\omega)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \sin \omega t dt$$

TF(signal RMN) (u.a.)

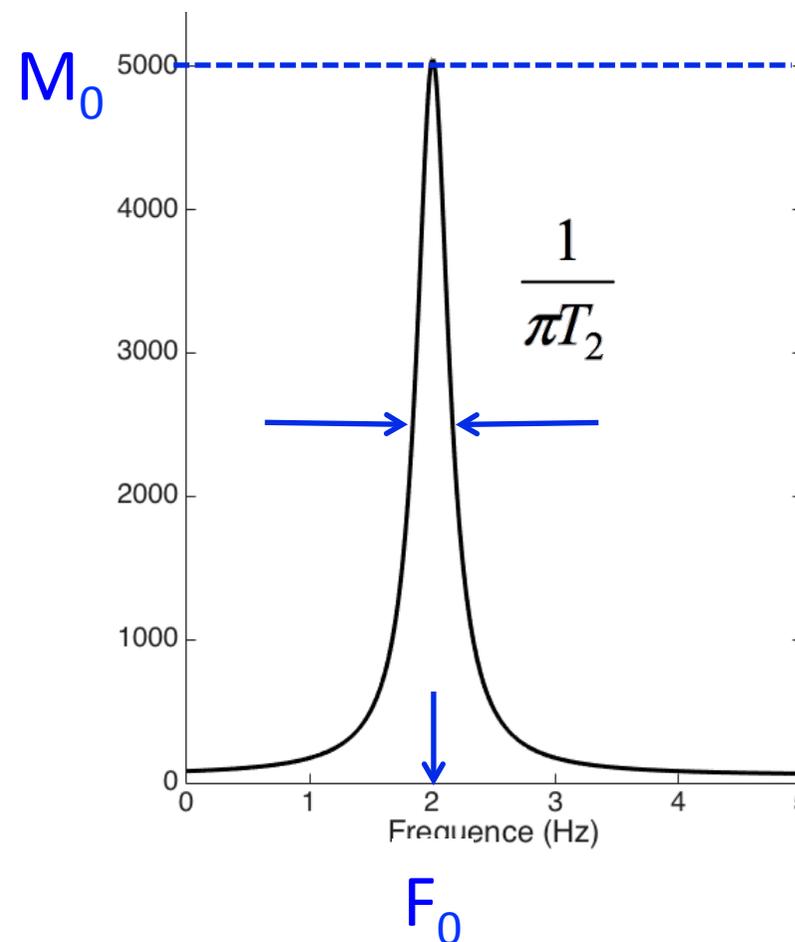


# Transformée de Fourier

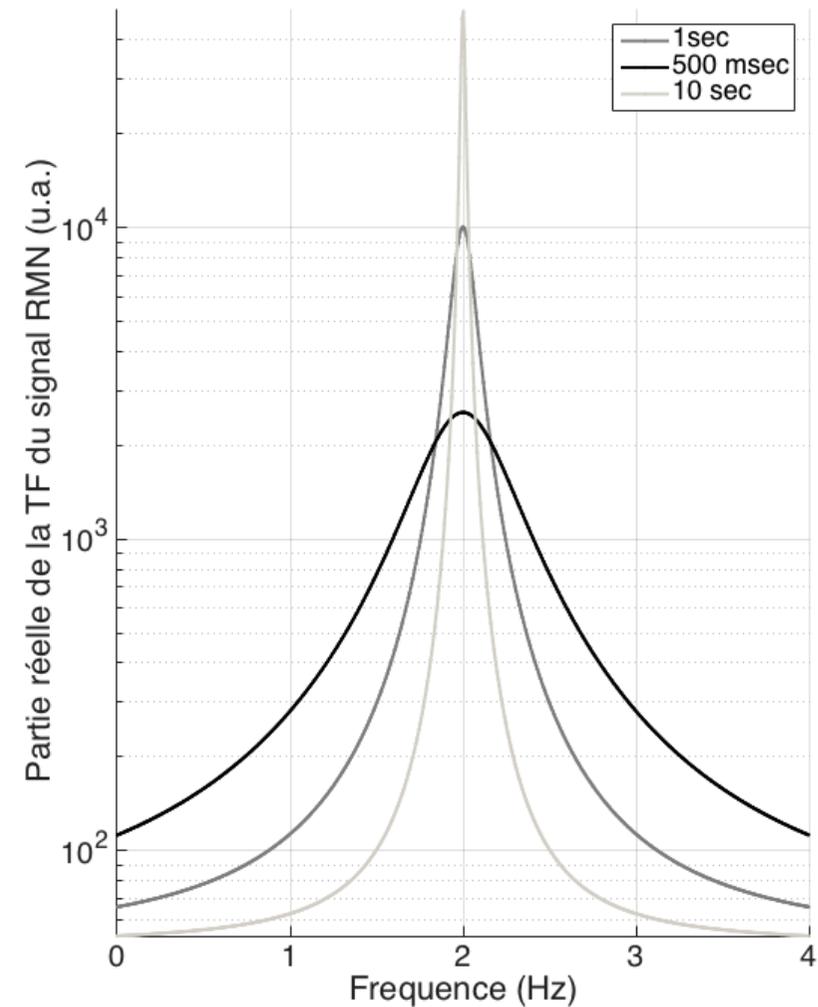
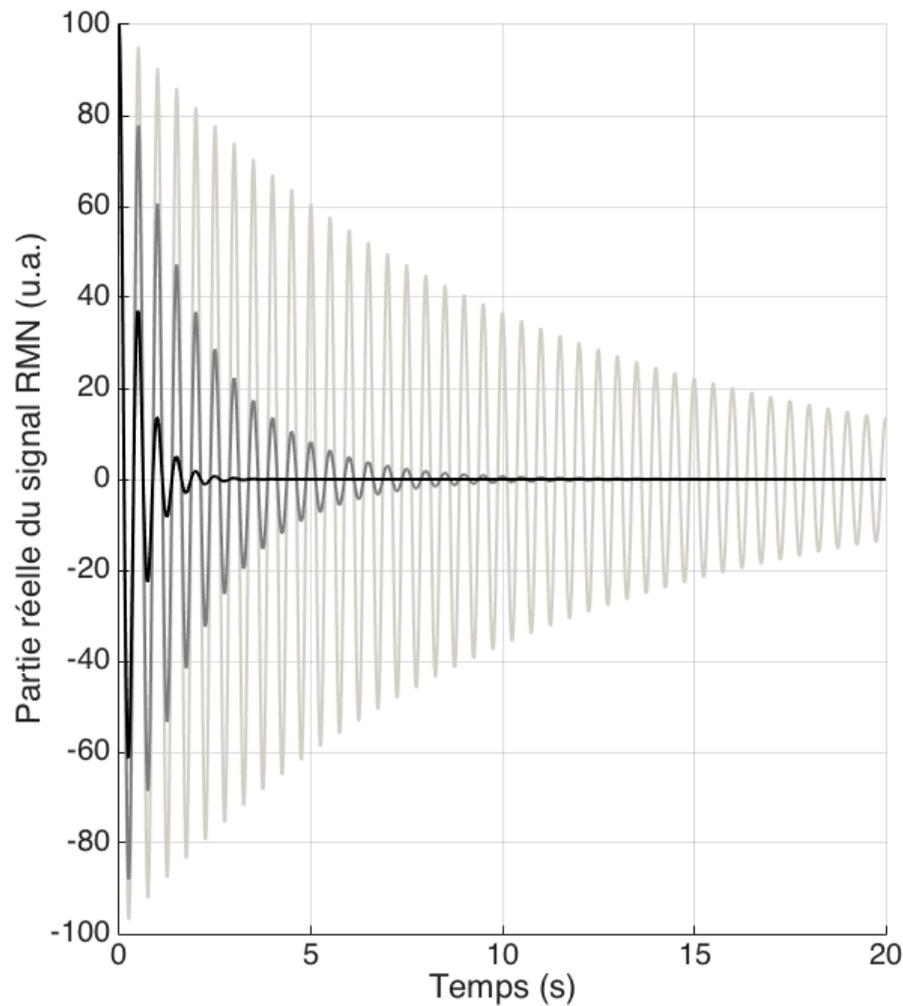
signal RMN (u.a.)



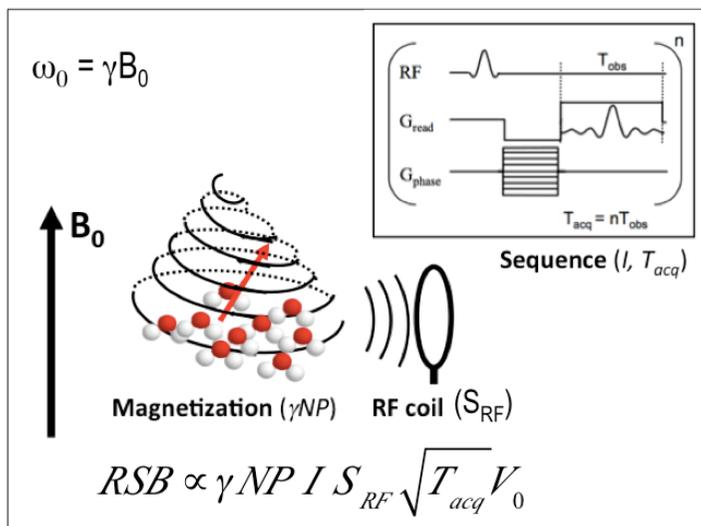
TF(signal RMN) (u.a.)



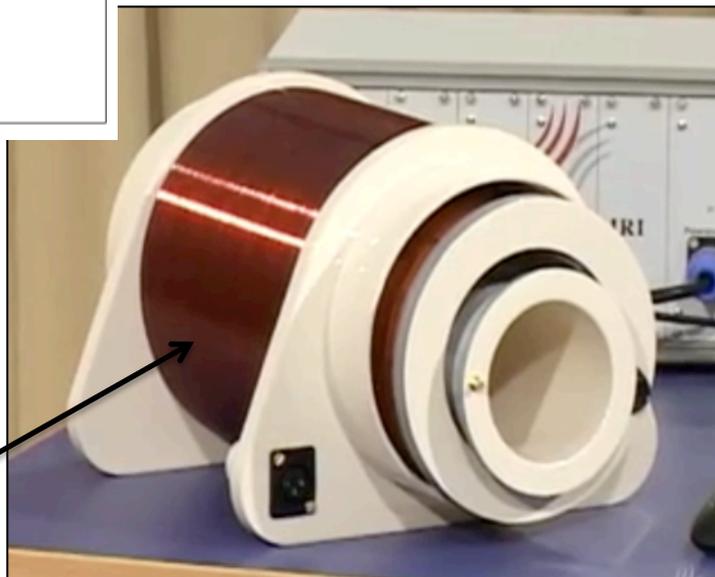
# Influence de l'amortissement T2 sur la largeur de la raie



# Instrumentation en l'IRM

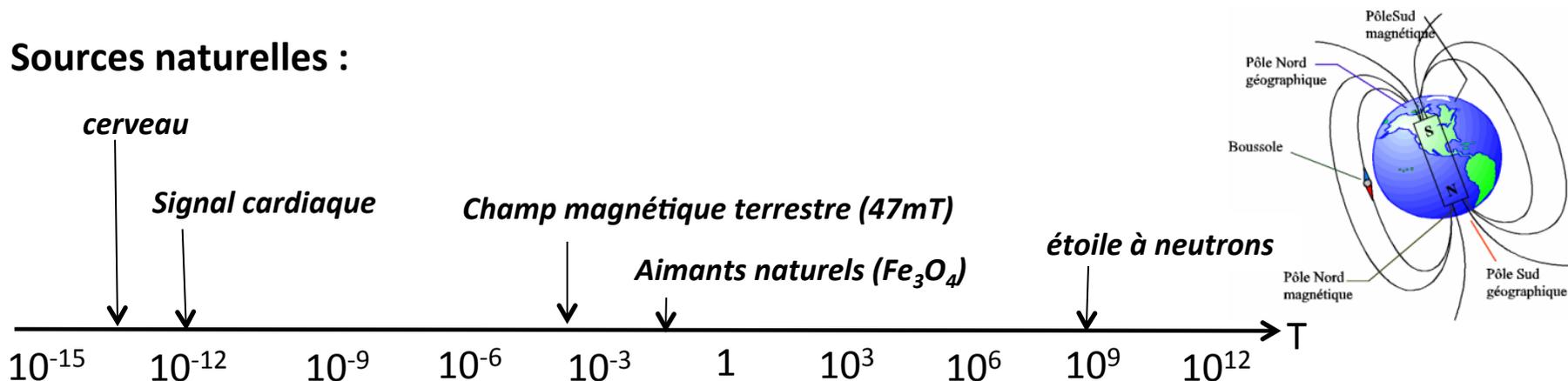


**Champ magnétique  
statique  $B_0$**  (Tesla)  
Precession des spins  
nucléaire à  
 $\omega_0 = \gamma B_0$   
**Pulsation de Larmor**

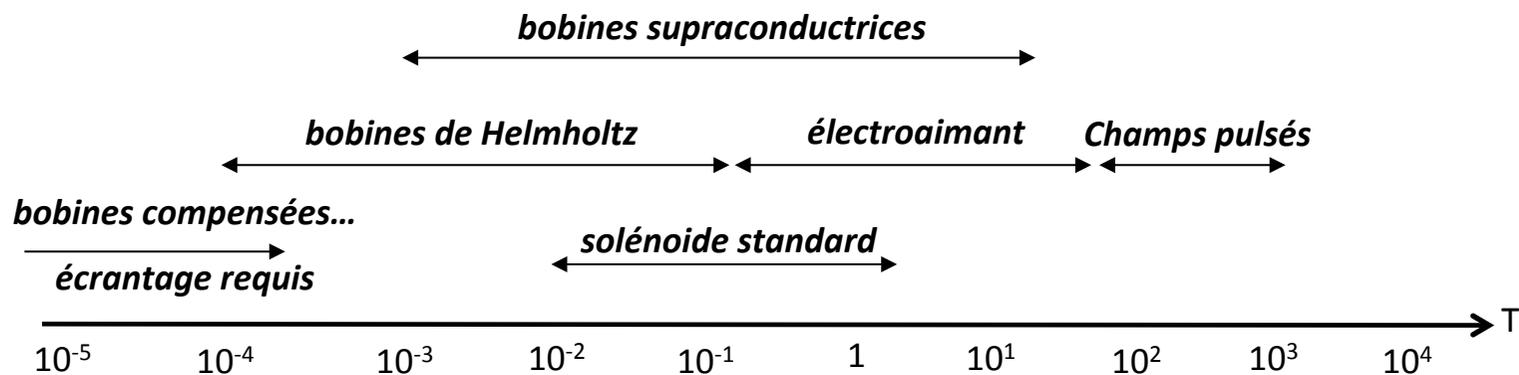


# Champ magnétique statique

## Sources naturelles :



## Génération des champ magnétiques :







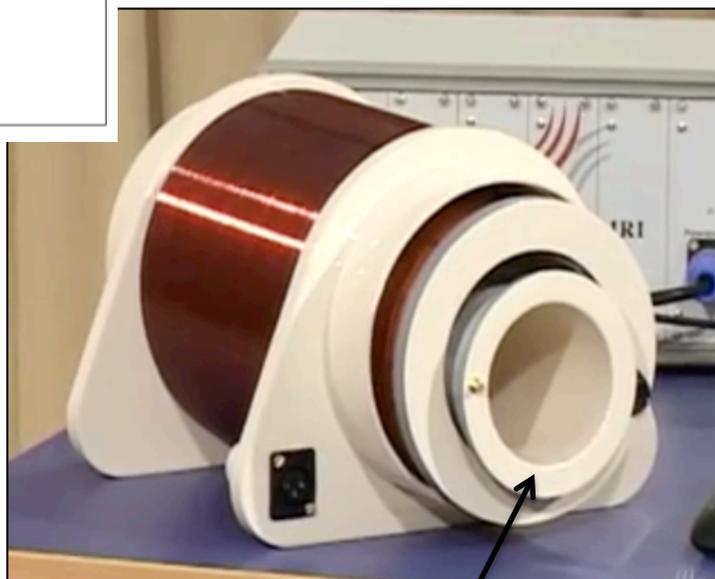
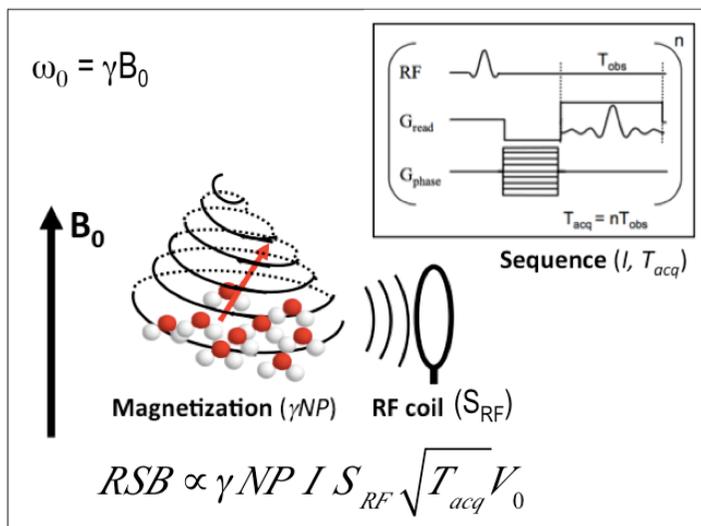
# Objets compatibles ou non avec une IRM



# Objets compatibles ou non avec une IRM



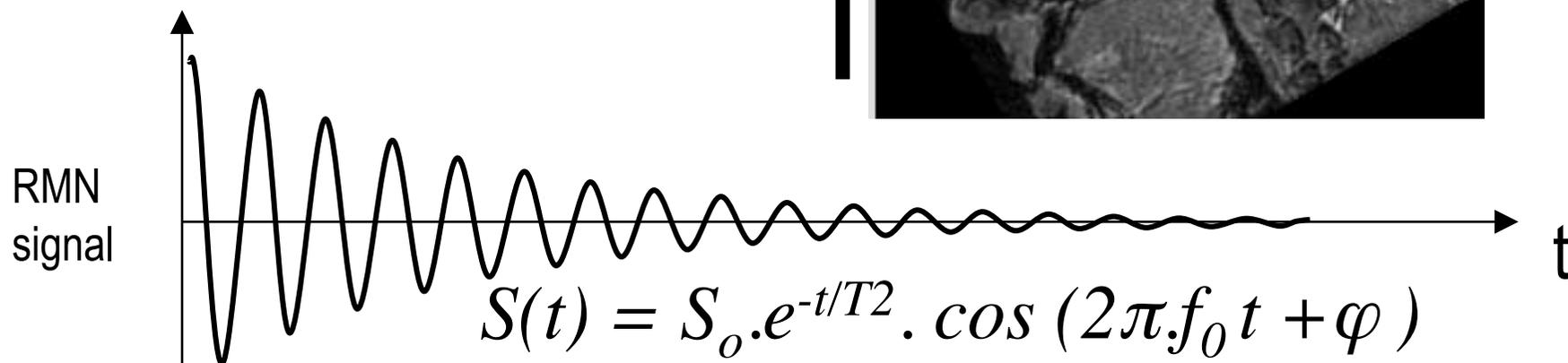
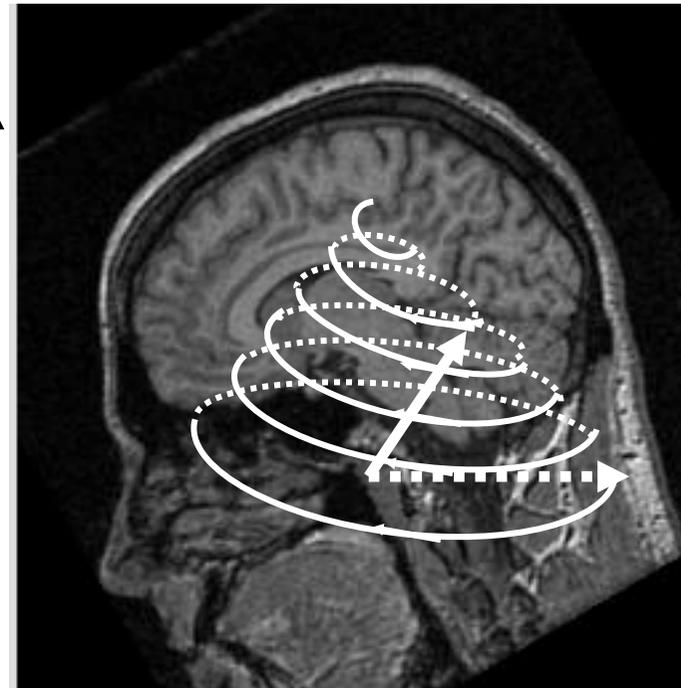
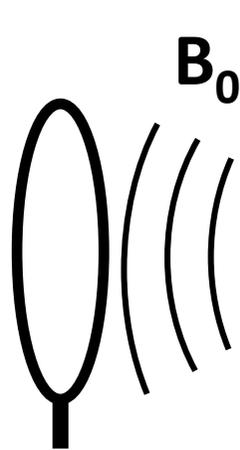
# Instrumentation en l'IRM



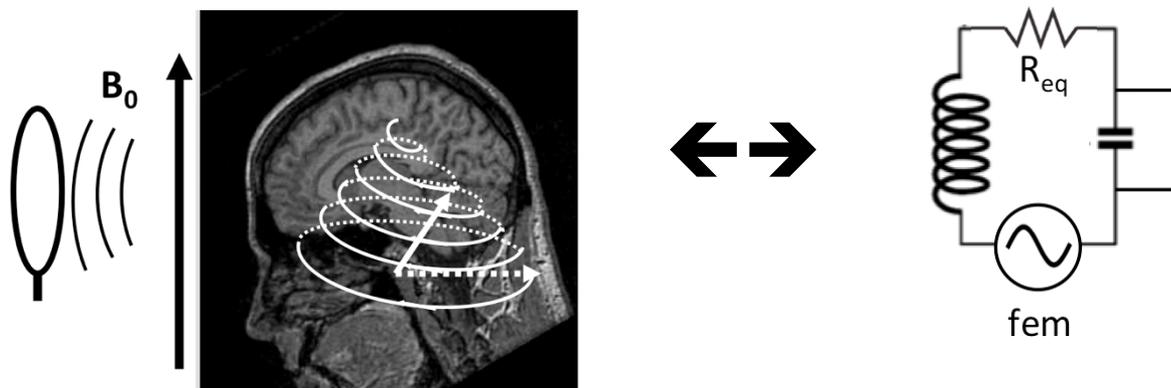
Antenne RF

# Précession libre et relaxation

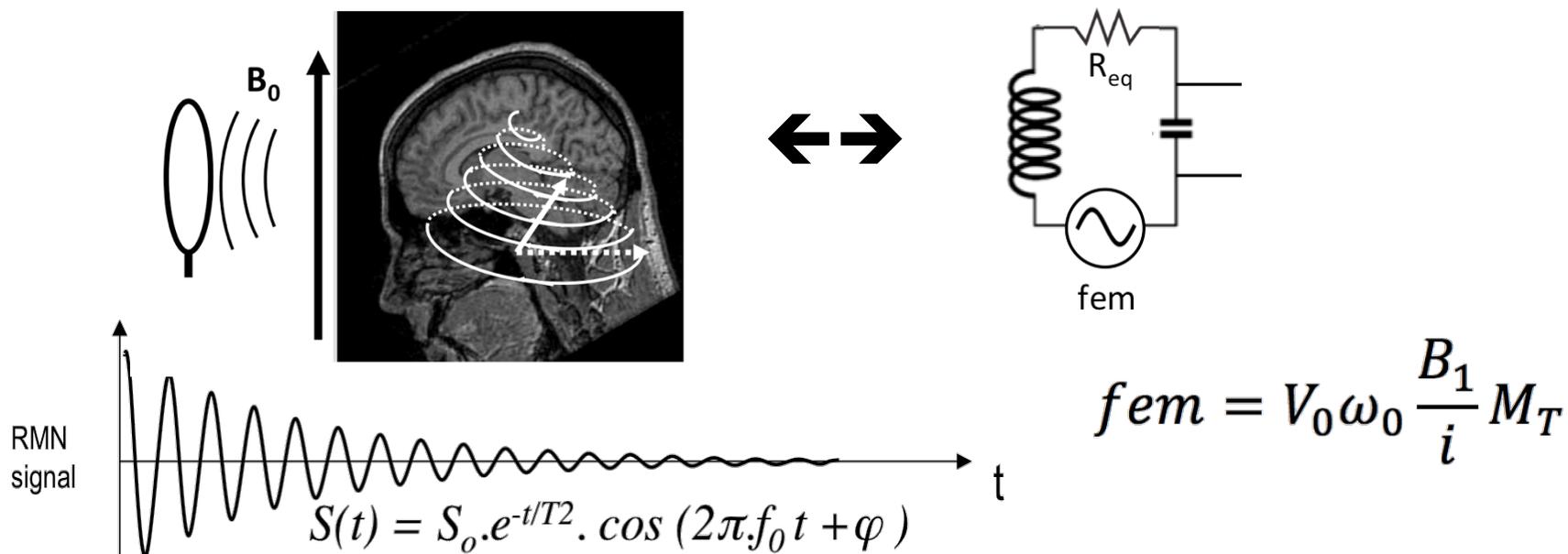
$$\omega_0 = \gamma B_0$$



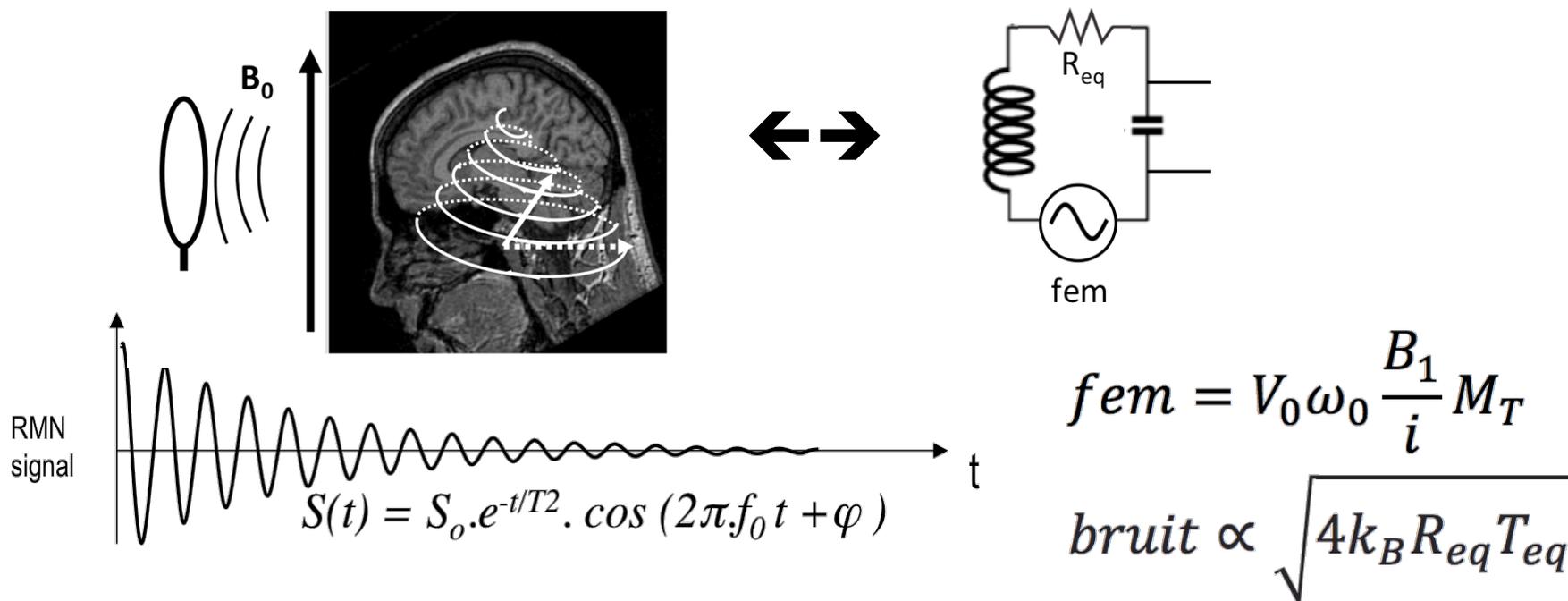
# Sensibilité du détecteur



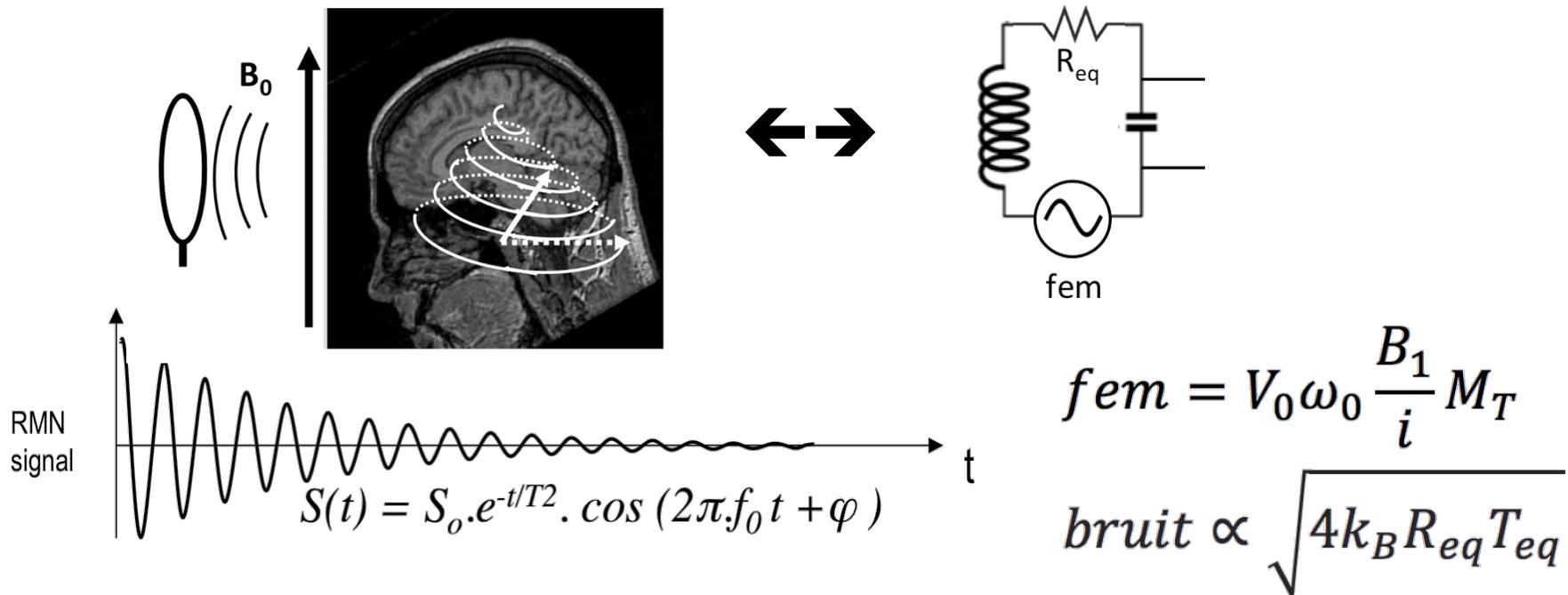
# Sensibilité du détecteur



# Sensibilité du détecteur



# Sensibilité du détecteur

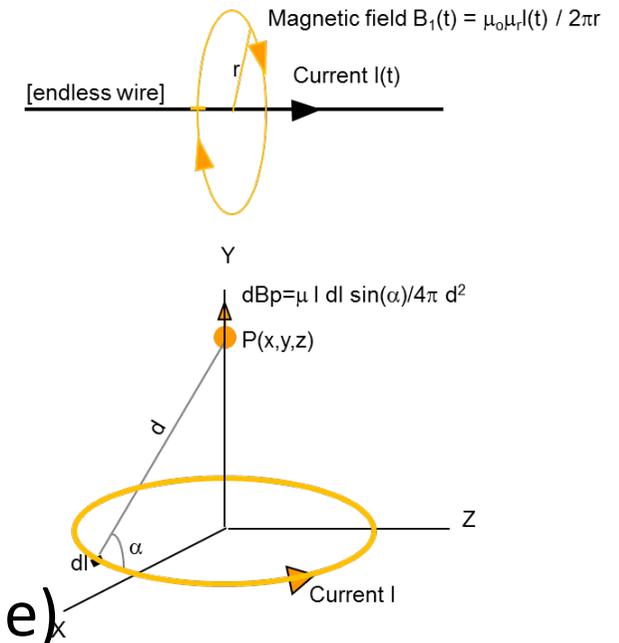


Sensibilité Radio Fréquence

$$S_{RF} \propto \frac{B_1/i}{\sqrt{4k_B R_{eq} T_{eq}}}$$

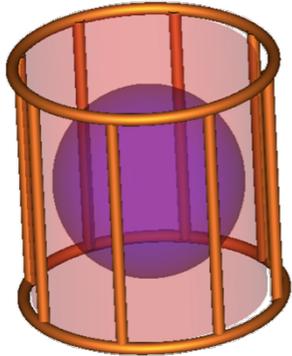
# Champ $B_1$ RF - Equations

- Equation de Maxwell
  - Gaus's law for magnetism ( $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ )
  - Faraday's law ( $\text{fem} = d\phi/dt$ )
  - Ampere's law (corrected,  $\text{rot} \cdot \mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mathbf{J}$ )
- Loi de Biot-Savart's (en champ proche)
  - Relation entre courant et champ magnétique
- Règle des "3 doigts"
  - Determination de la direction de  $B_1$

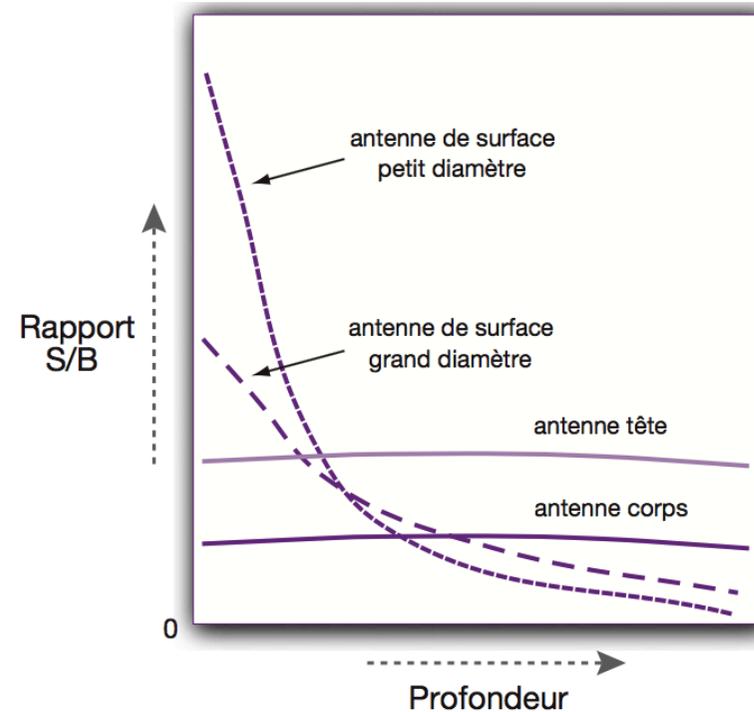


# Antennes de volume et de surface

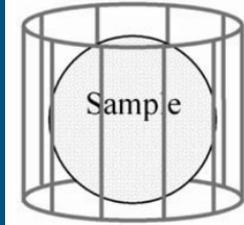
## Antenne de volume



- Réponse @uniforme
- SNR limité par l'objet

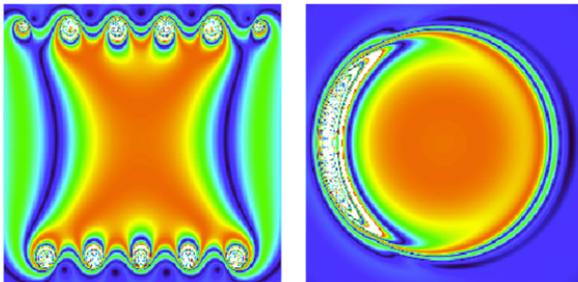
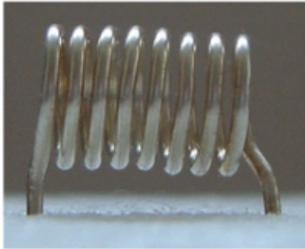


# Antennes RF de volume

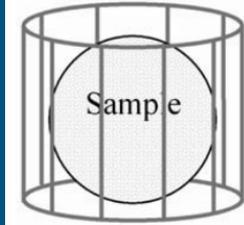


solénoïde

**Solénoïde**



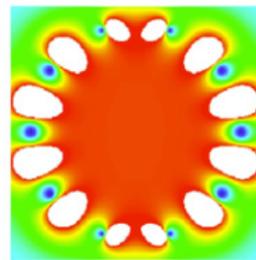
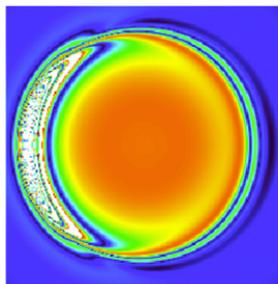
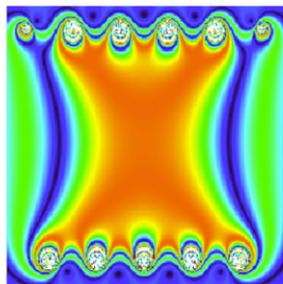
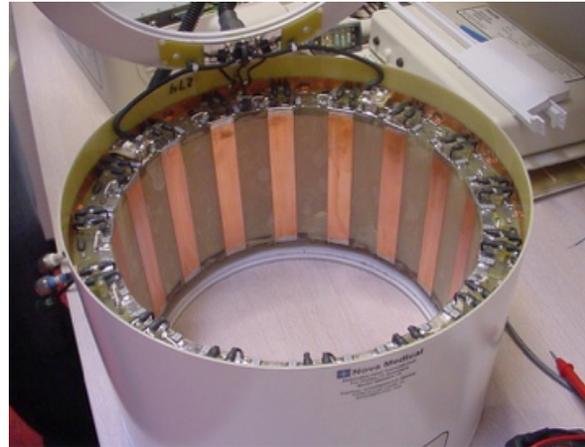
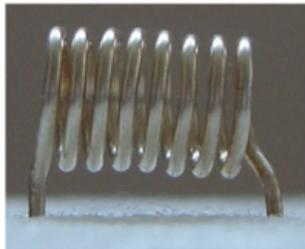
# Antennes RF de volume



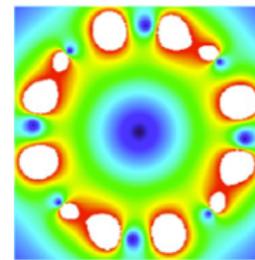
solénoïde

birdcage

Solénoïde

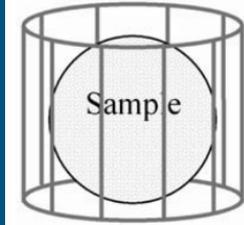


k=1



k=2

# Antennes RF de volume

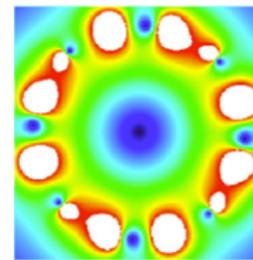
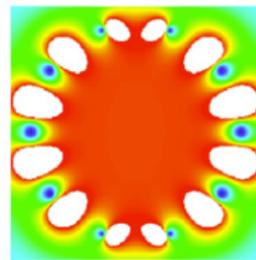
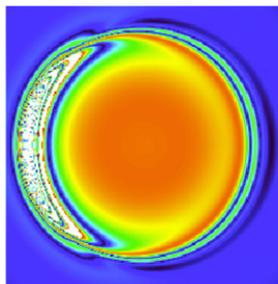
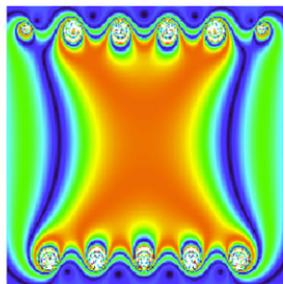
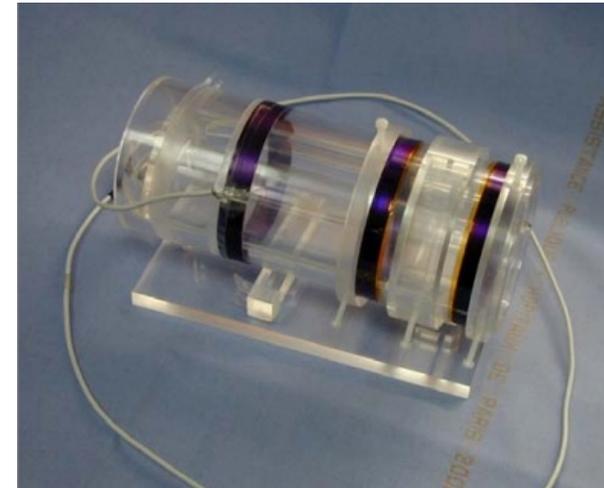
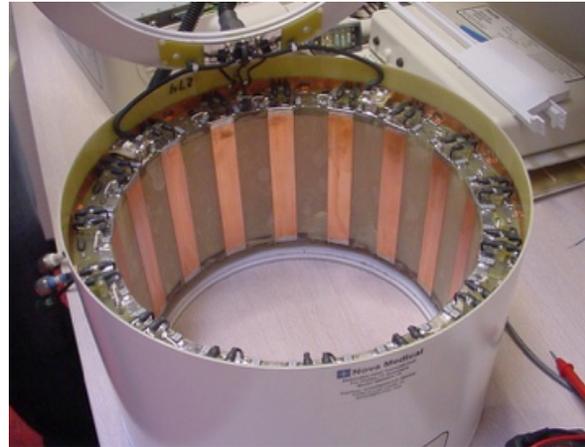
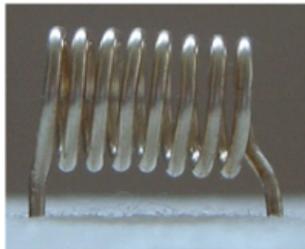


solénoïde

birdcage

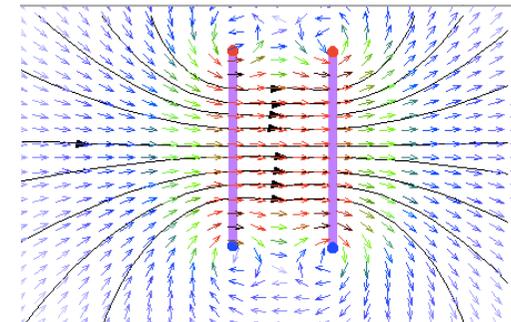
Bobine d'Helmoltz

Solénoïde



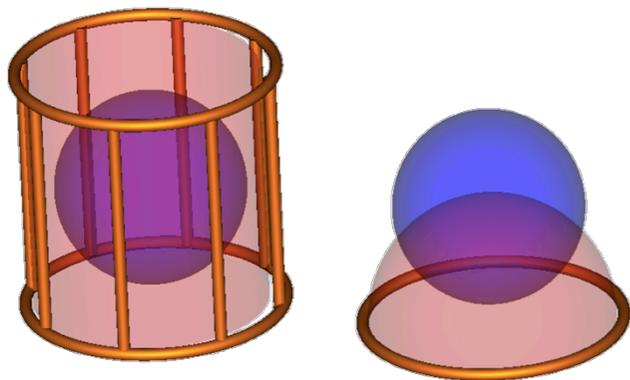
$k=1$

$k=2$



# Antennes de volume et de surface

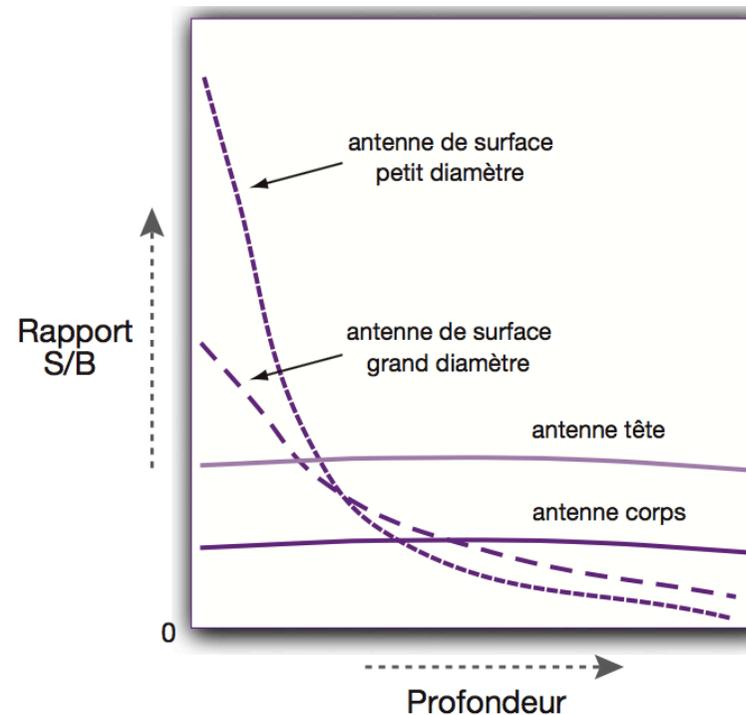
Antenne de volume



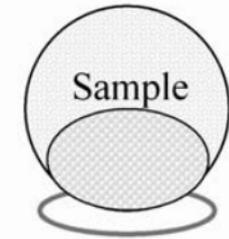
Antenne de surface

$$S_{RF} \propto \frac{\omega a^{-5/2}}{\sqrt{T_{ech}}}$$

- Réponse locale
- SNR élevé



# Surface (flat) coil

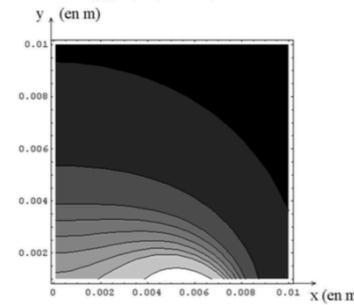


Surface coil

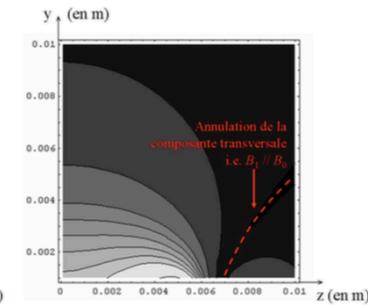


AJR june 2007 vol  
188 no 6  
1568-1572

a) Homogénéité de  $B_1$  dans le plan transversal XoY



b) Homogénéité de  $B_1$  dans le plan transversal YoZ



c) position de l'antenne par rapport au champ  $B_0$

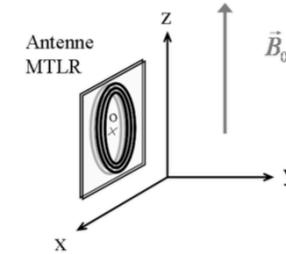
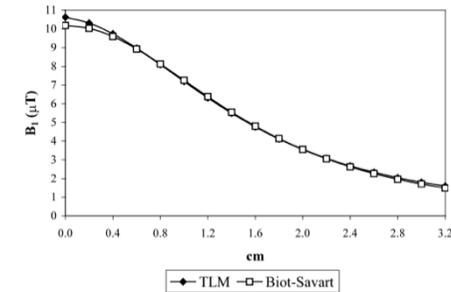


Figure II-8 : Homogénéité du champ RF créé par une antenne MTLR (Ø 12mm, 6 tours, pour  $^1\text{H}$  à 1,5 T)

Surface Coil

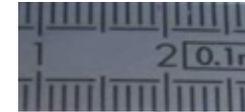


Electromagnetic characterization of MR RF coils using the transmission-line modelling method, Cassidy et al. 2001

# Amélioration de la sensibilité

- Miniaturisation du capteur en cuivre
  - Diminution du bruit de l'objet observé

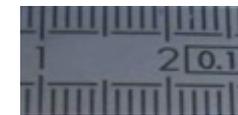
*Woytasik, M., et al., 2007*



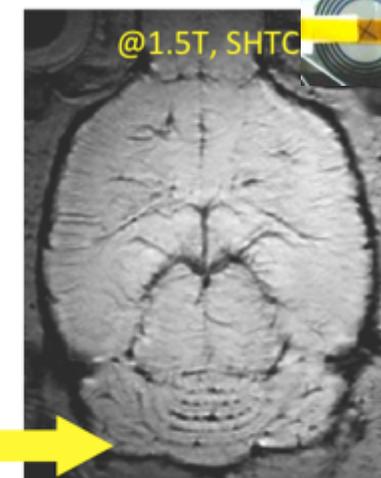
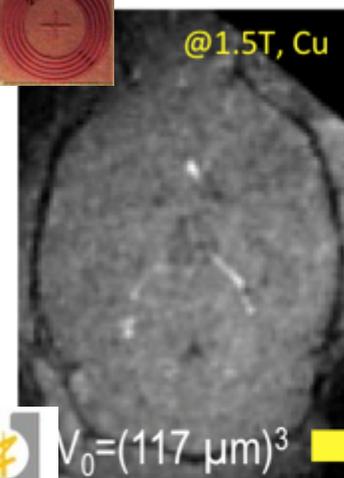
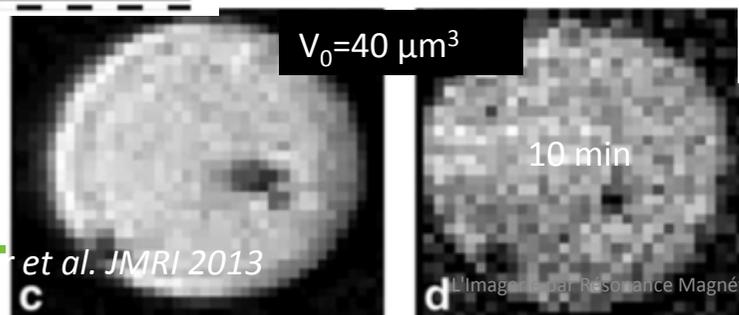
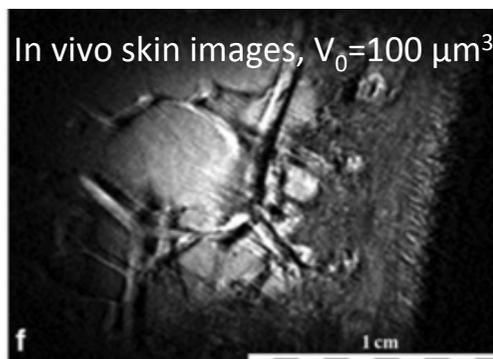
# Amélioration de la sensibilité

- Miniaturisation du capteur en cuivre
  - Diminution du bruit de l'objet observé

*Woytasik, M., et al., 2007*



- Nouveaux matériaux, YBCO
  - Diminution du bruit du détecteur
  - Gain en RSB de 3 à 16



RSB x 5

*Laistler et al. JMRI 2013*

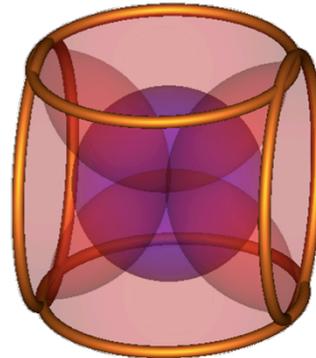
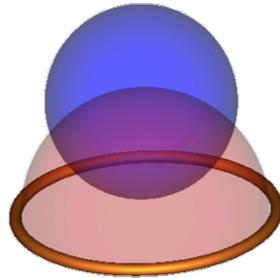
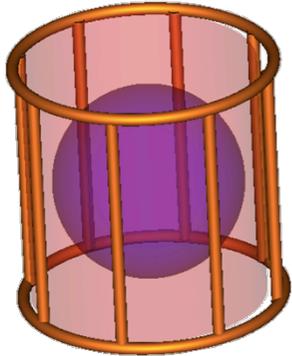
*Poirier-Quinot, M., Tis. Eng. Part C, 2010*

*Smirnov et al., MRM 2008*

*et al. JMRI 2013*

# Antennes de volume et de surface

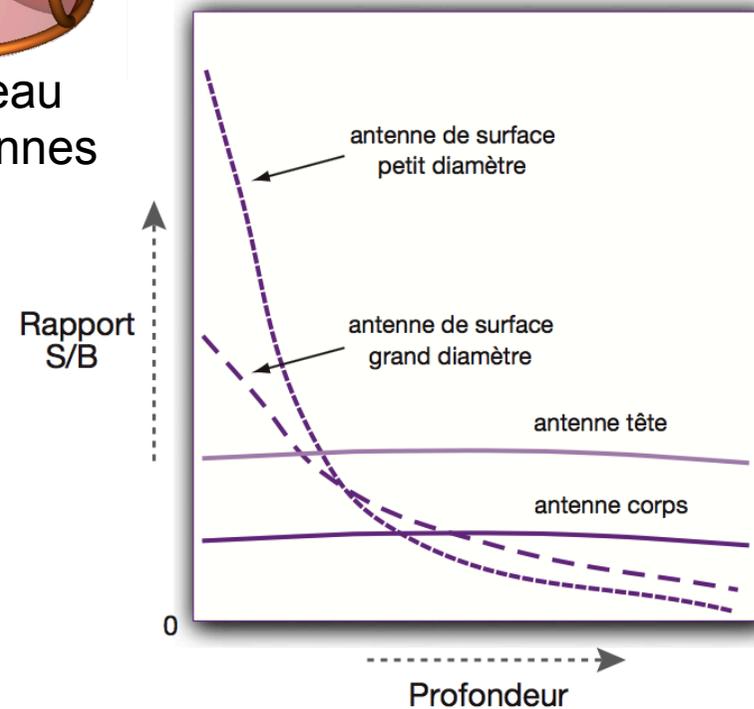
Antenne de volume



Antenne de surface

Réseau  
d'antennes

- Réponse étendue
- SNR optimale



# Réseau d'antennes

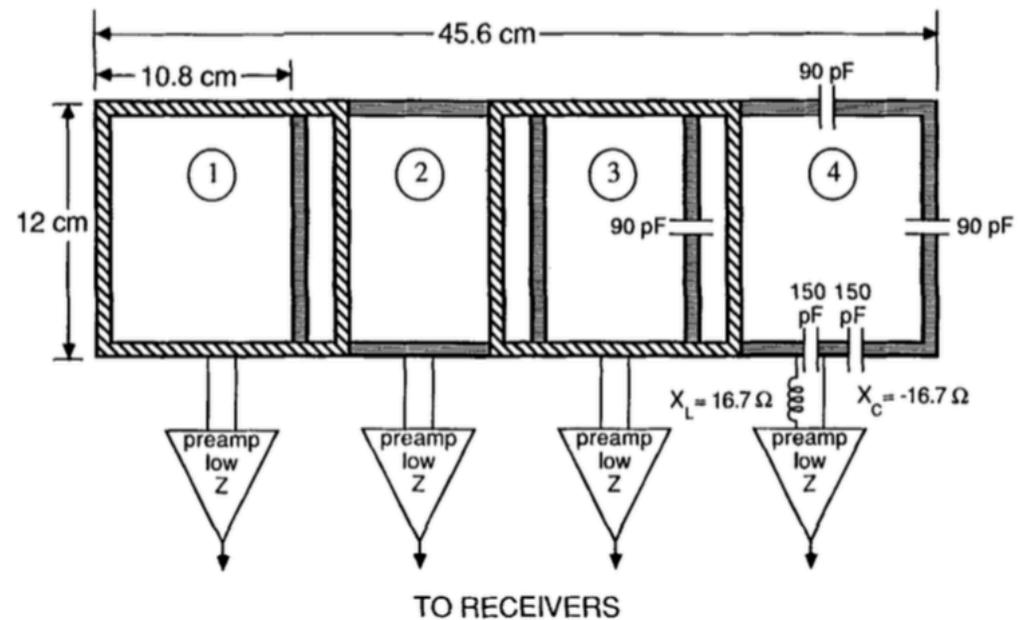
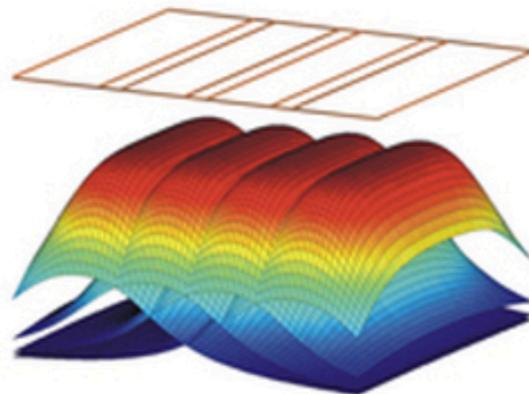
## Phased array and parallel array

MAGNETIC RESONANCE IN MEDICINE **16**, 192-225 (1990)

### The NMR Phased Array

P. B. ROEMER,\* W. A. EDELSTEIN,\* C. E. HAYES,† S. P. SOUZA,\*  
AND O. M. MUELLER\*

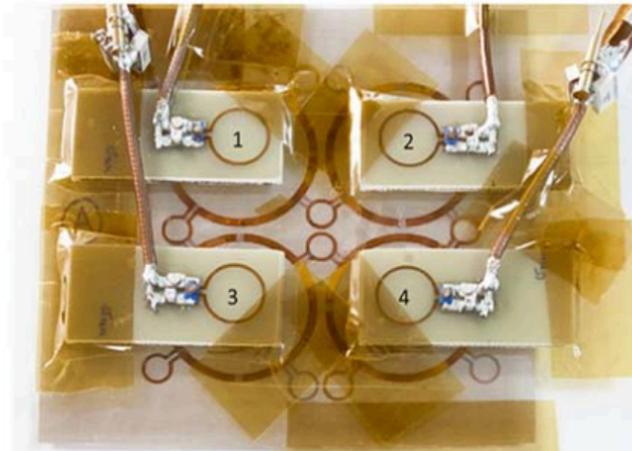
\*GE Corporate Research and Development Center, Schenectady, New York 12301;  
†GE Medical Systems, Milwaukee, Wisconsin 53201



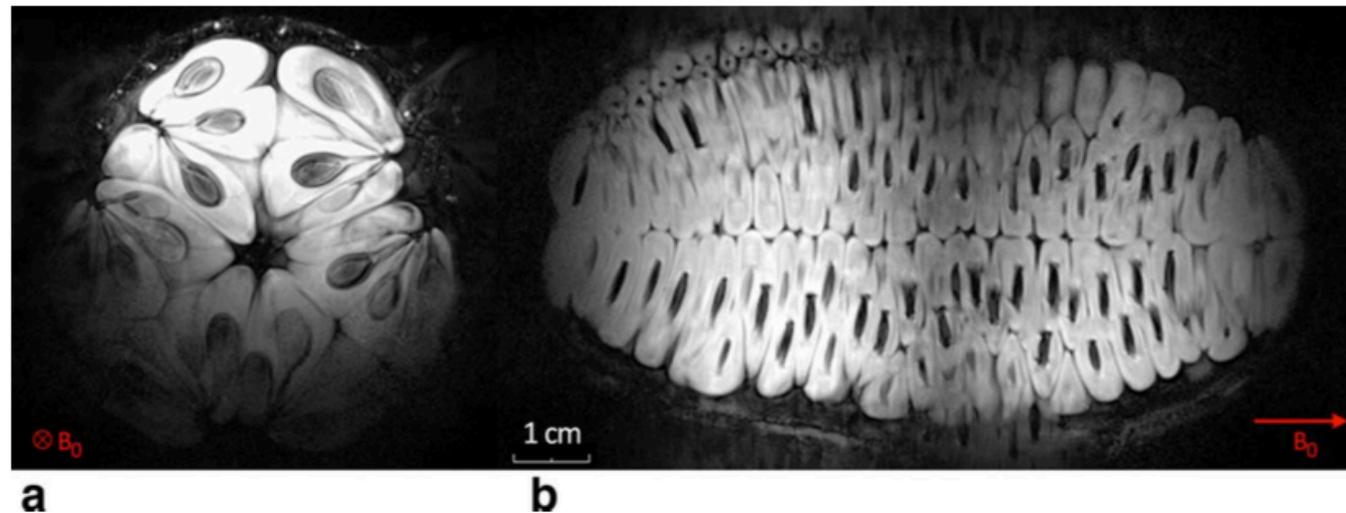
# Réseau d'antennes

## Phased array and parallel array

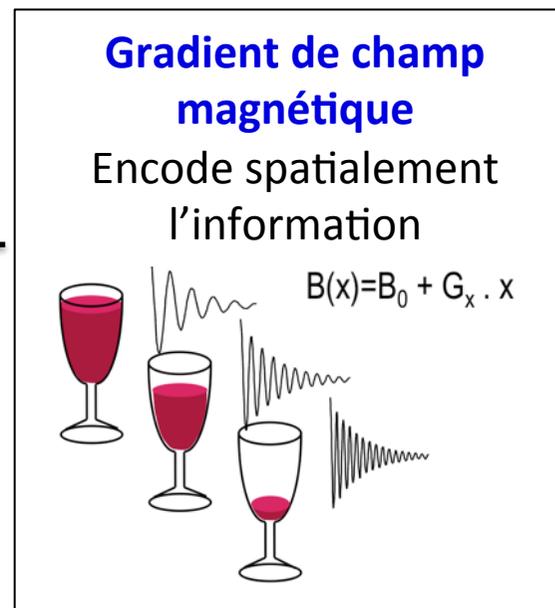
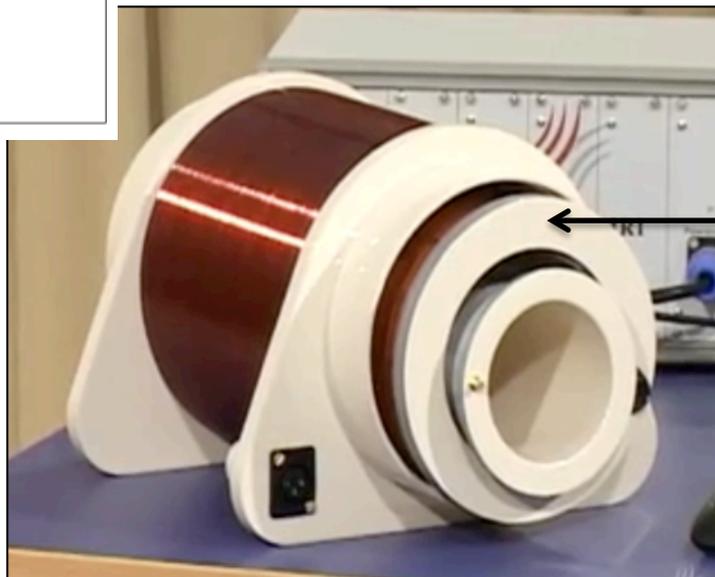
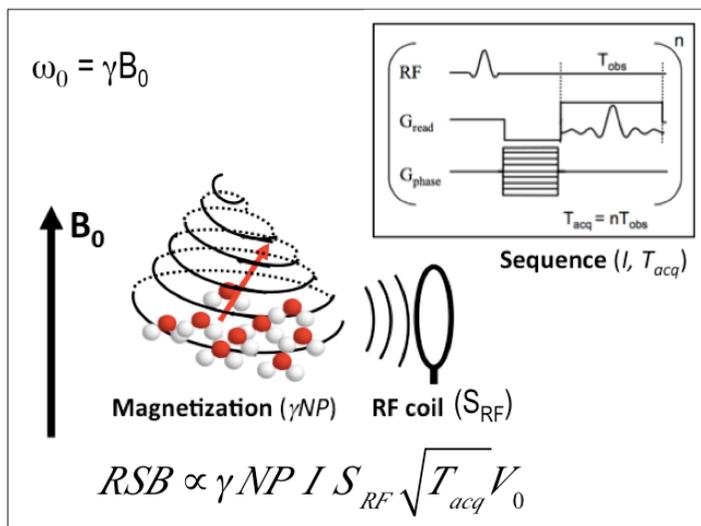
Array flat on torso phantom



Array bent on cylinder phantom



# Instrumentation en l'IRM

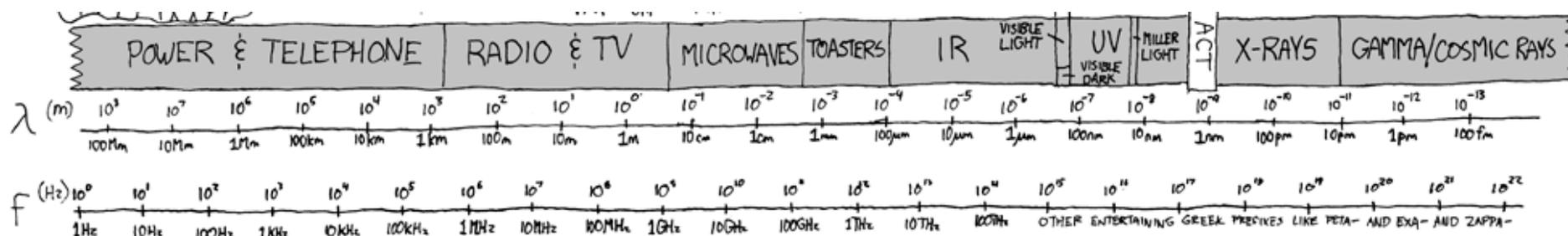


# Gradient de champ magnétique

IRM : dépendance spatiale du signal RMN

$$\lambda \sim 10 \text{ m}$$

localisation en IRM  $\sim \mu\text{m}$  (Mansfield prix Nobel de 2003)

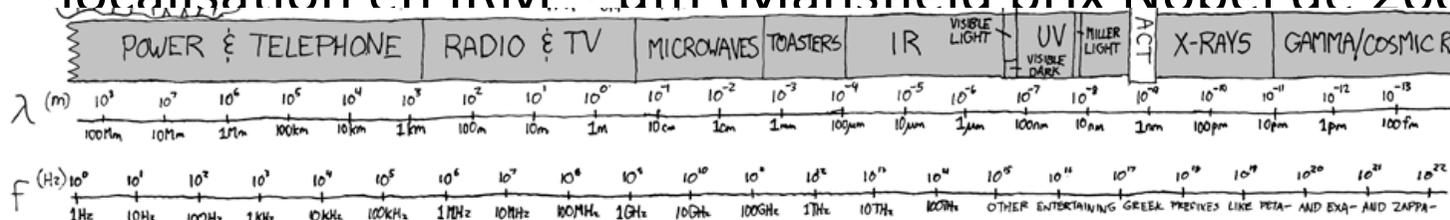


# Gradient de champ magnétique

IRM : dépendance spatiale du signal RMN

$$\lambda \sim 10 \text{ m}$$

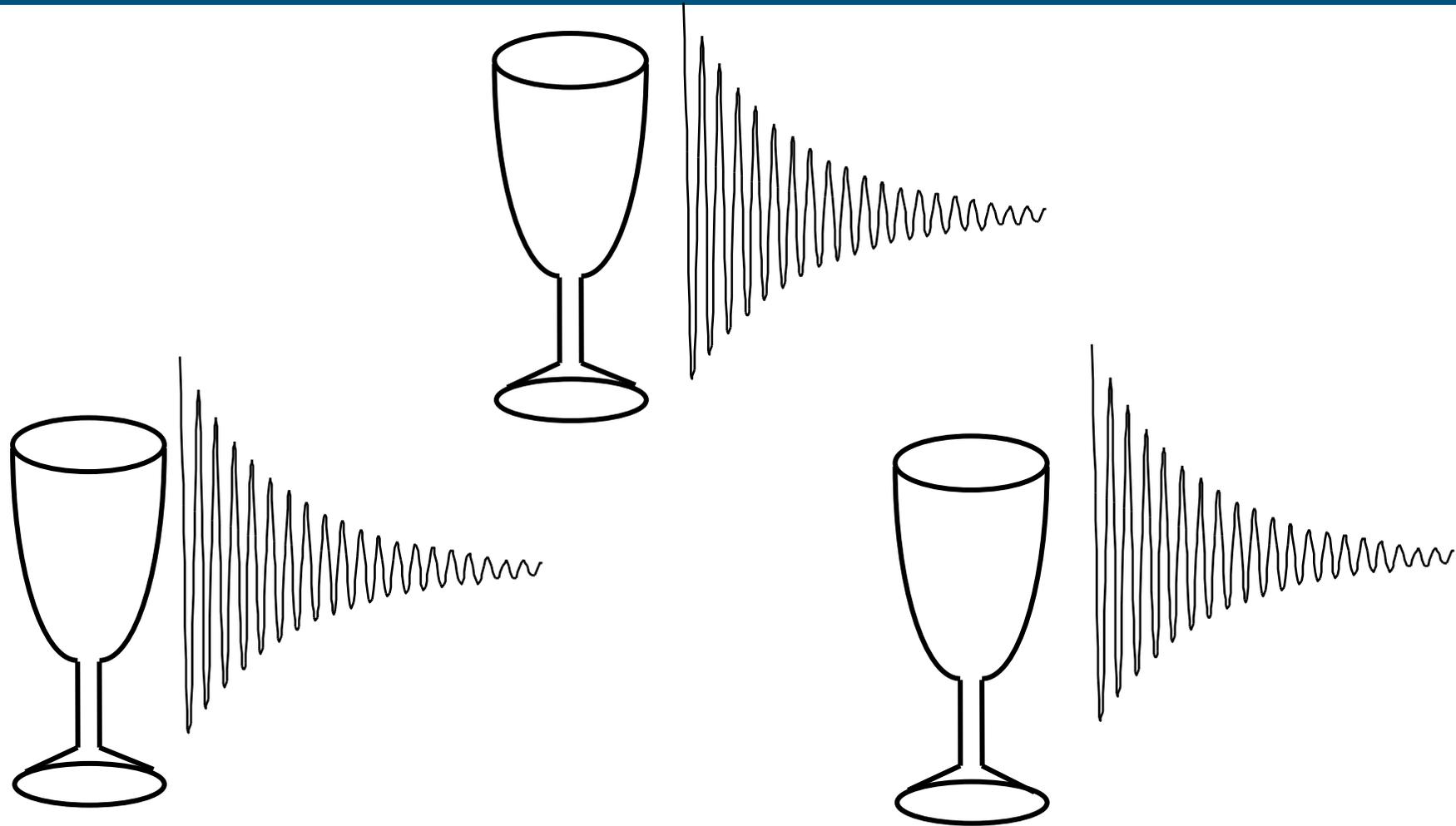
localisation en IRM  $\sim \mu\text{m}$  (Mansfield prix Nobel de 2003)



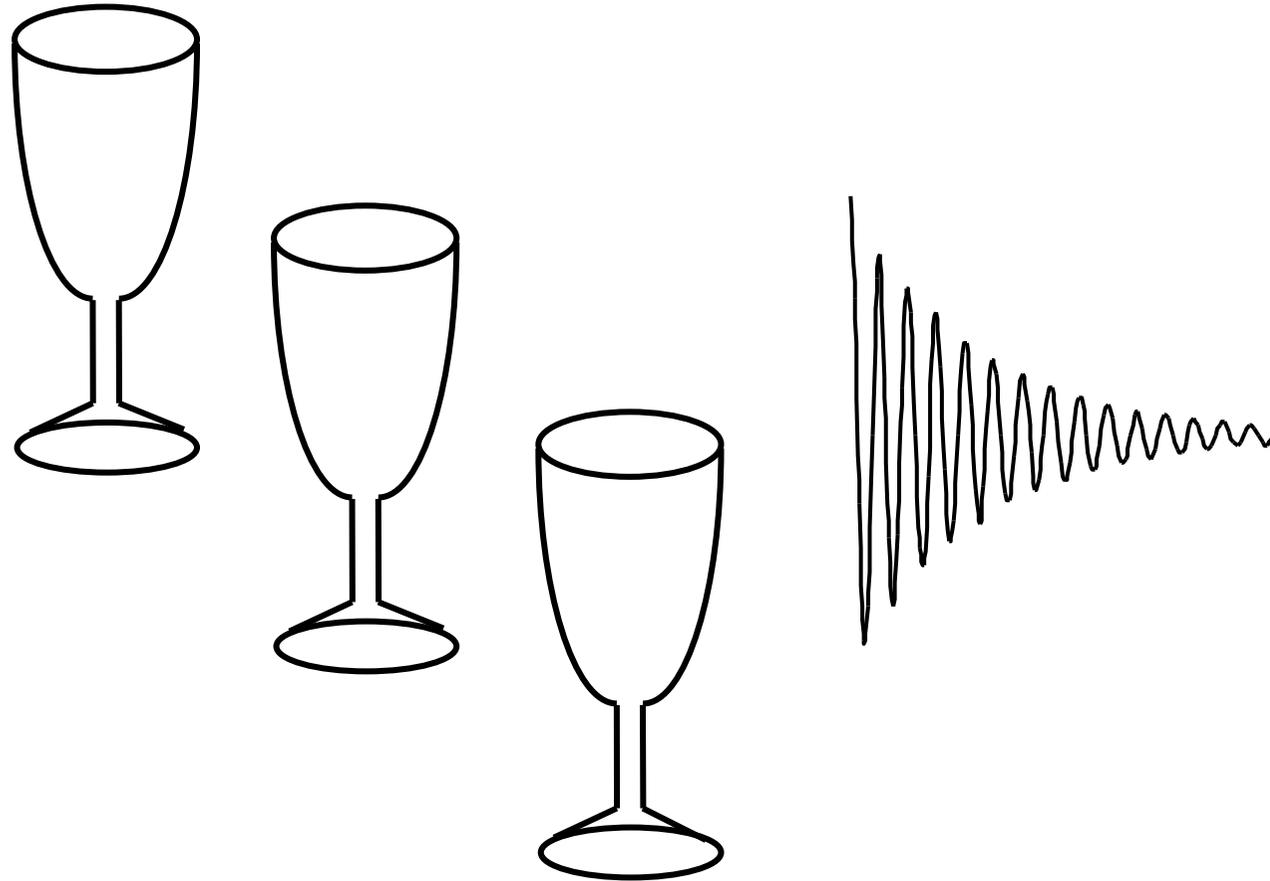
Modification de l'interaction des spins nucléaires avec le champ  $\rightarrow$  absorption des énergies légèrement différentes

Position spatiale discriminée par le décalage spatial de la fréquence (gradients d'imagerie G)

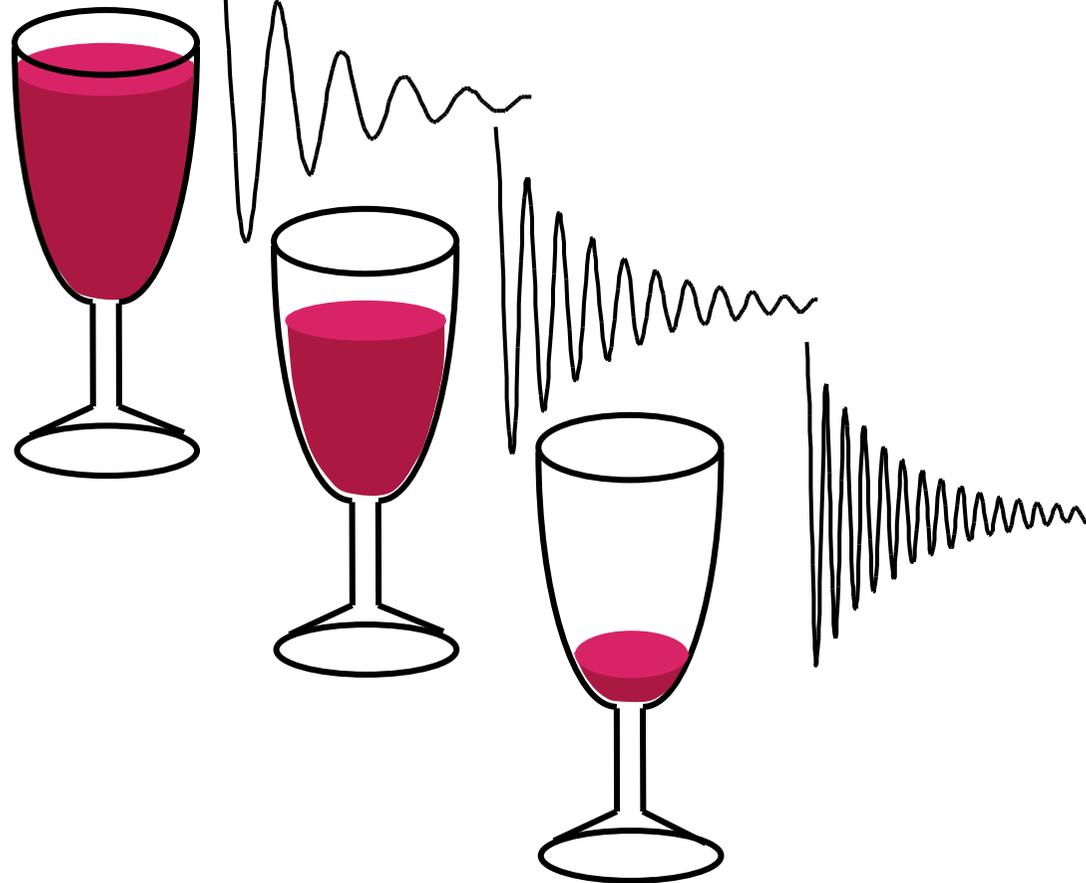
# Localisation par la Distance



# Localisation par la fréquence



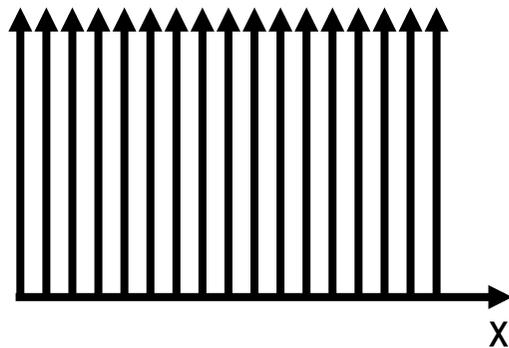
# Localisation par la fréquence



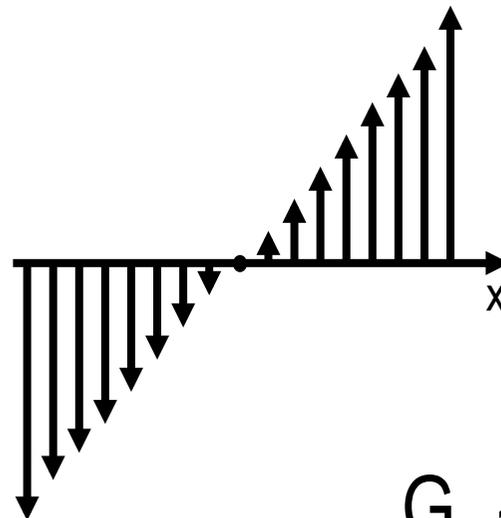
Localisation du signal RMN réalisée grâce à l'application de gradient produisant une variation linéaire et contrôlé de  $B_0$  (direction  $z$ ) et créant un petite perturbation du champ dans les 3 directions ( $x$ ,  $y$  et  $z$ )

# Gradient de Champ Magnétique

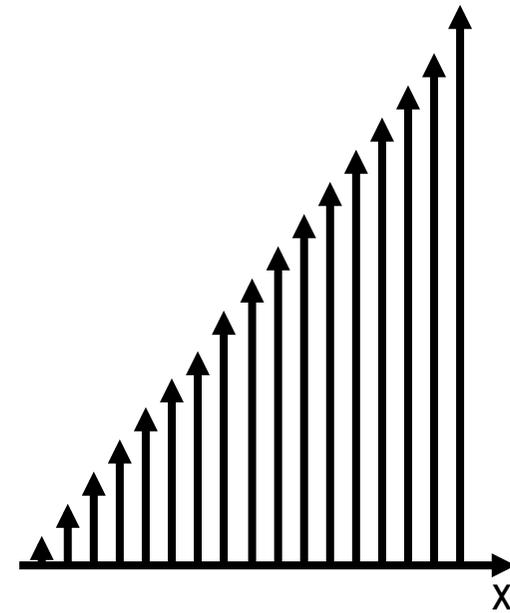
$$B(x) = B_0$$



$$B(x) = G_x \cdot x$$

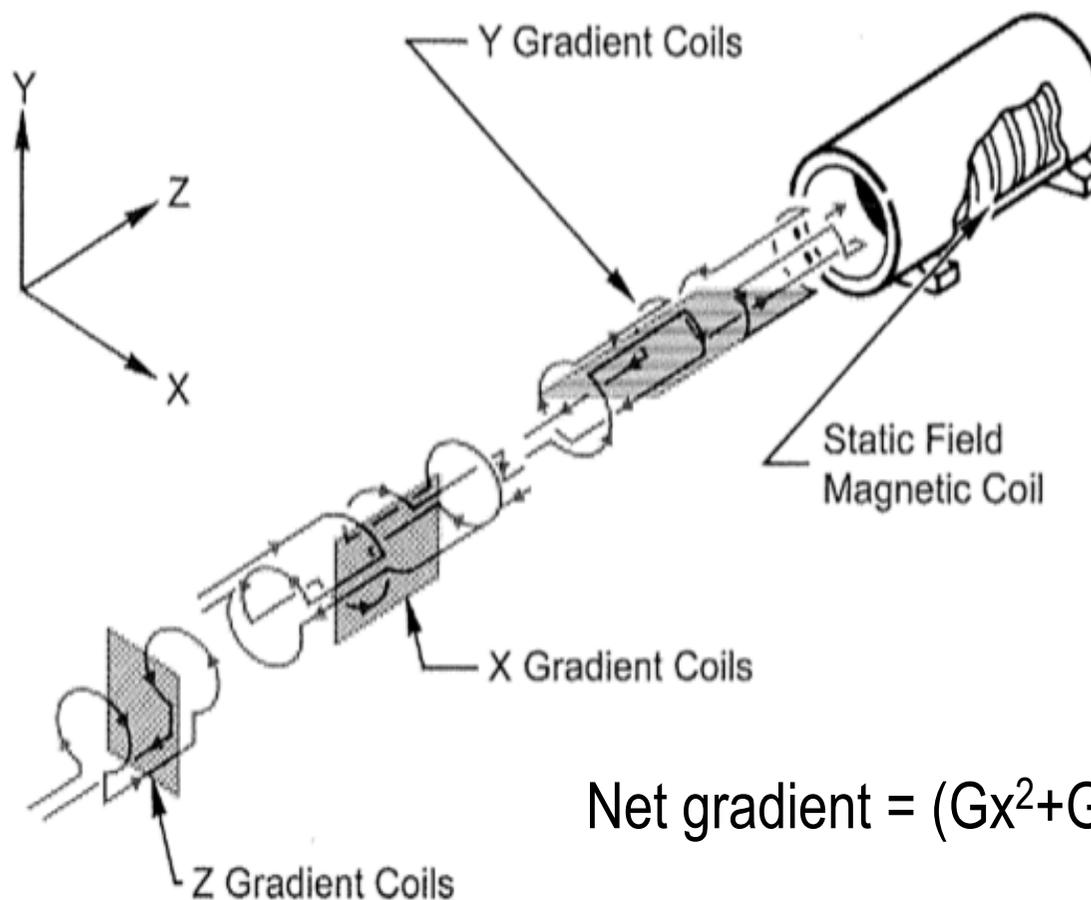


$$B(x) = B_0 + G_x \cdot x$$



$$G_x \approx 20 \text{ à } 400 \text{ mT/m}$$

# Gradients de Champ Magnétique



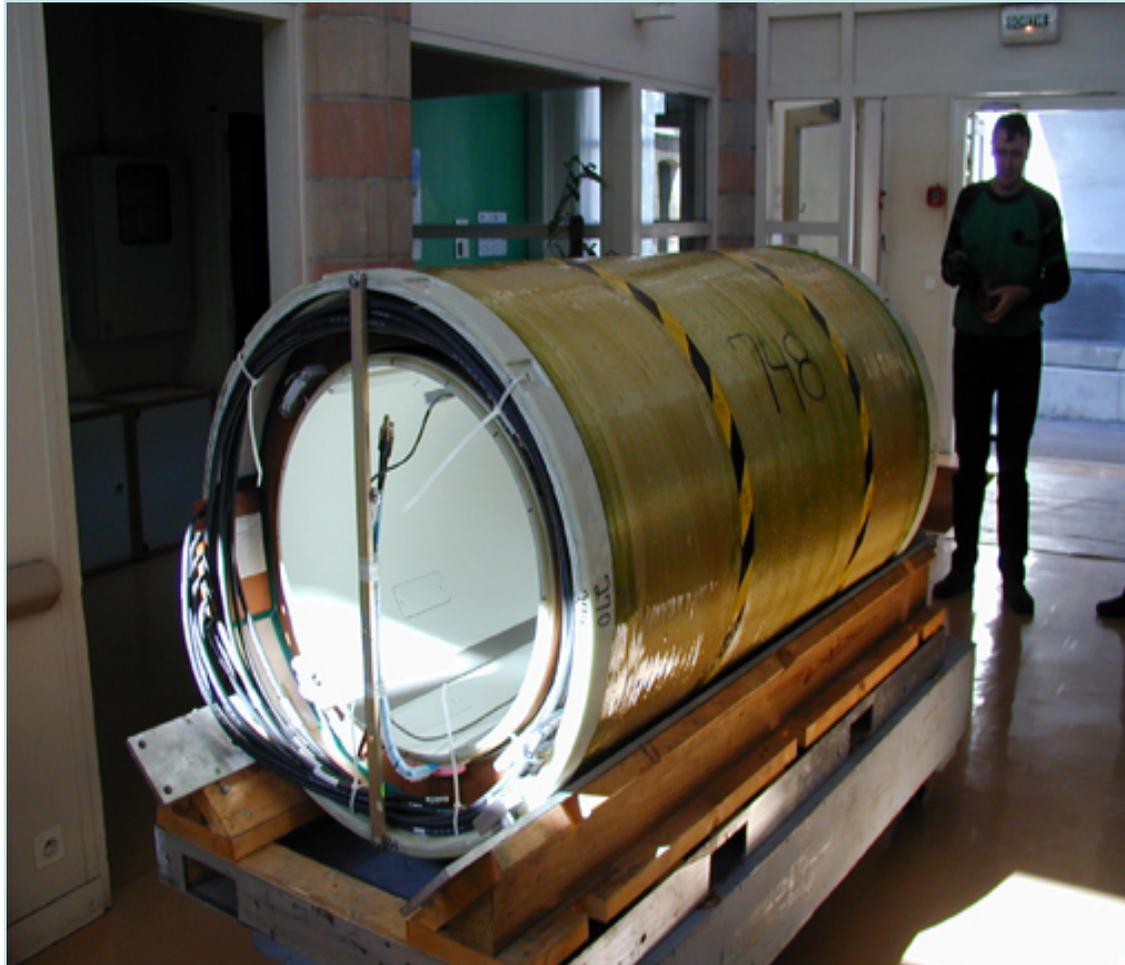
$$\text{Net gradient} = (G_x^2 + G_y^2 + G_z^2)^{1/2}$$

SMRT, vol.14, n.3

# Bobines de gradient



# Gradients of 23mT/m in 180 $\mu$ s ; 60cm bore



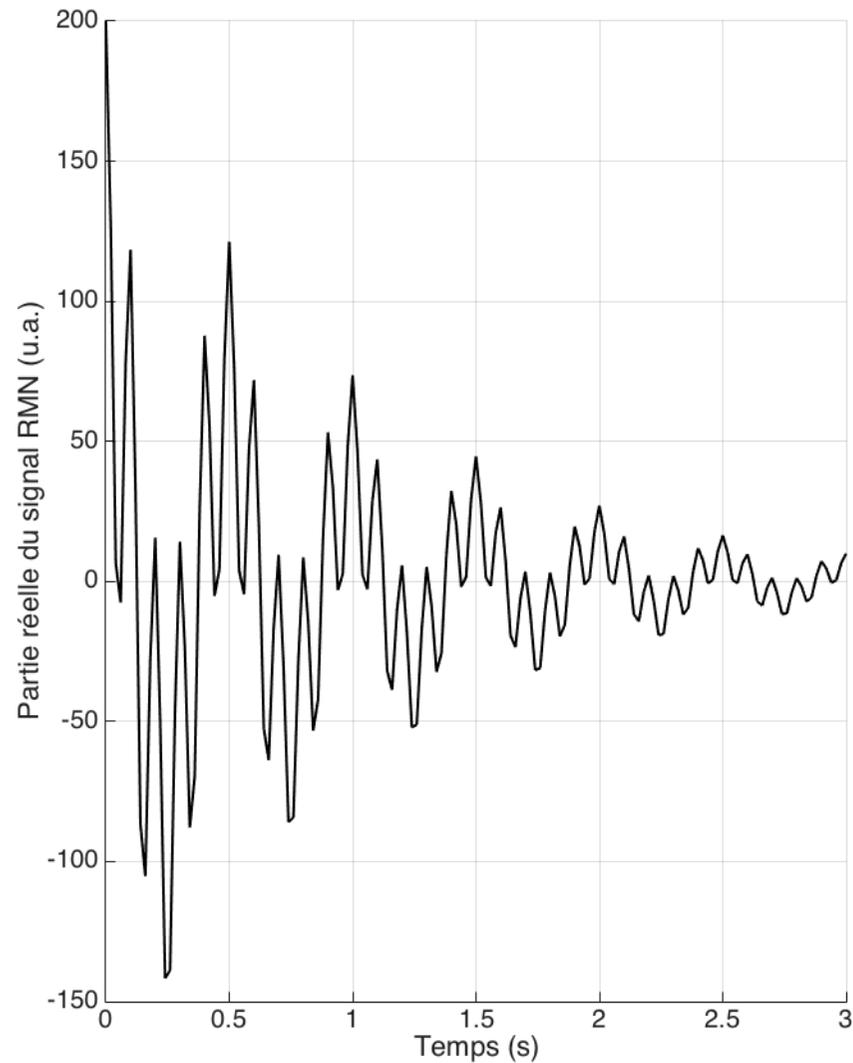
# Gradient de Champ Magnétique

A 1.5T, avec un gradient de lecture de 20 mT/m, que vaut la fréquence du signal à 10 cm du centre des gradients?

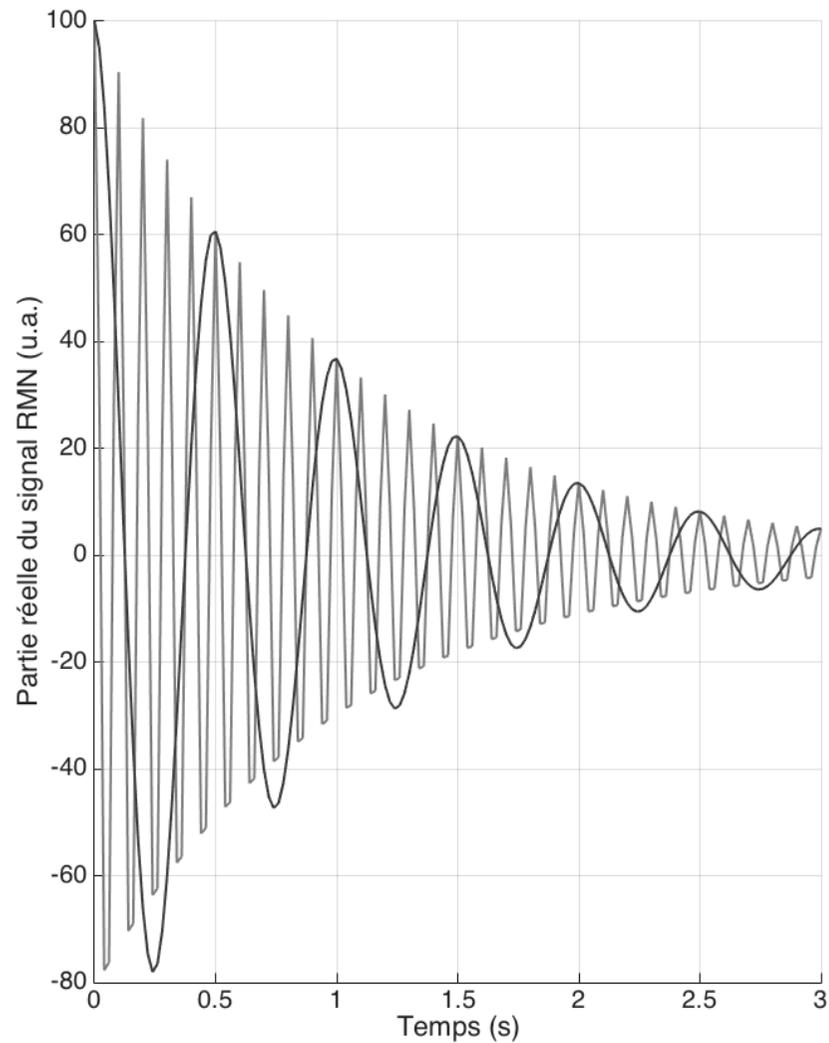
# Gradient et selection spatial du signal



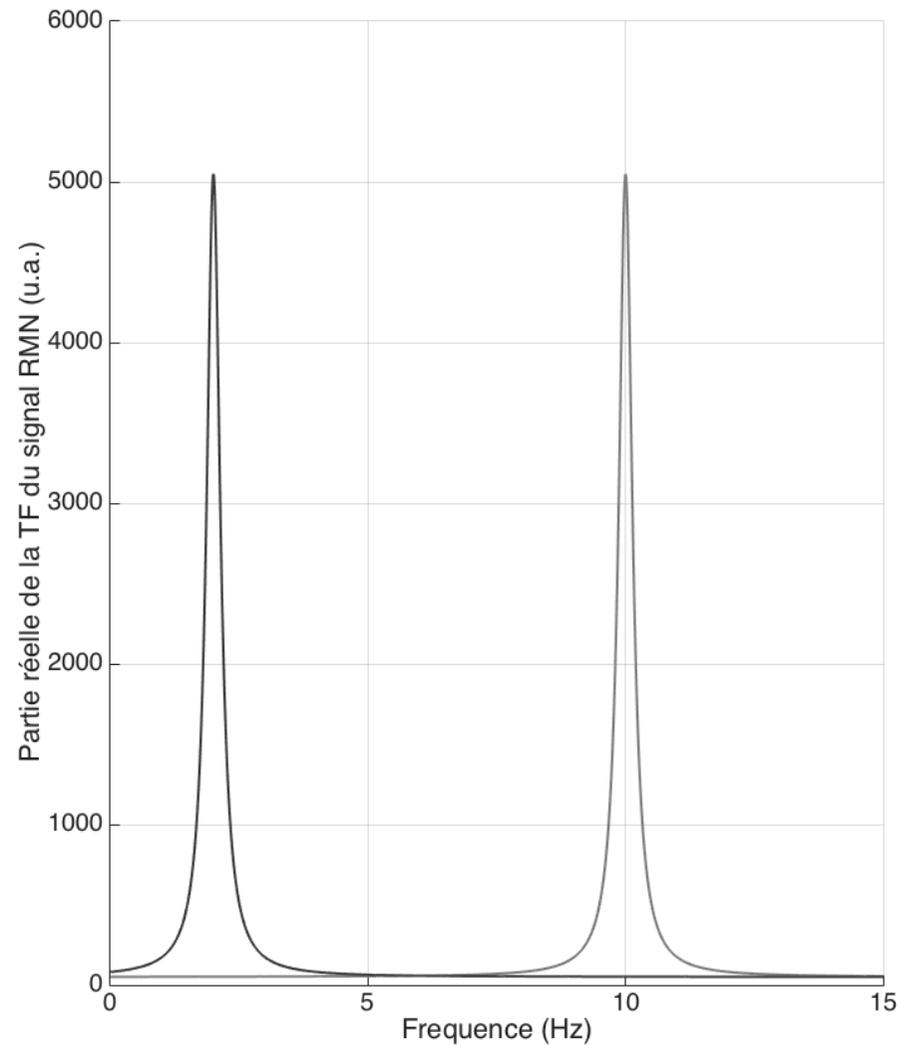
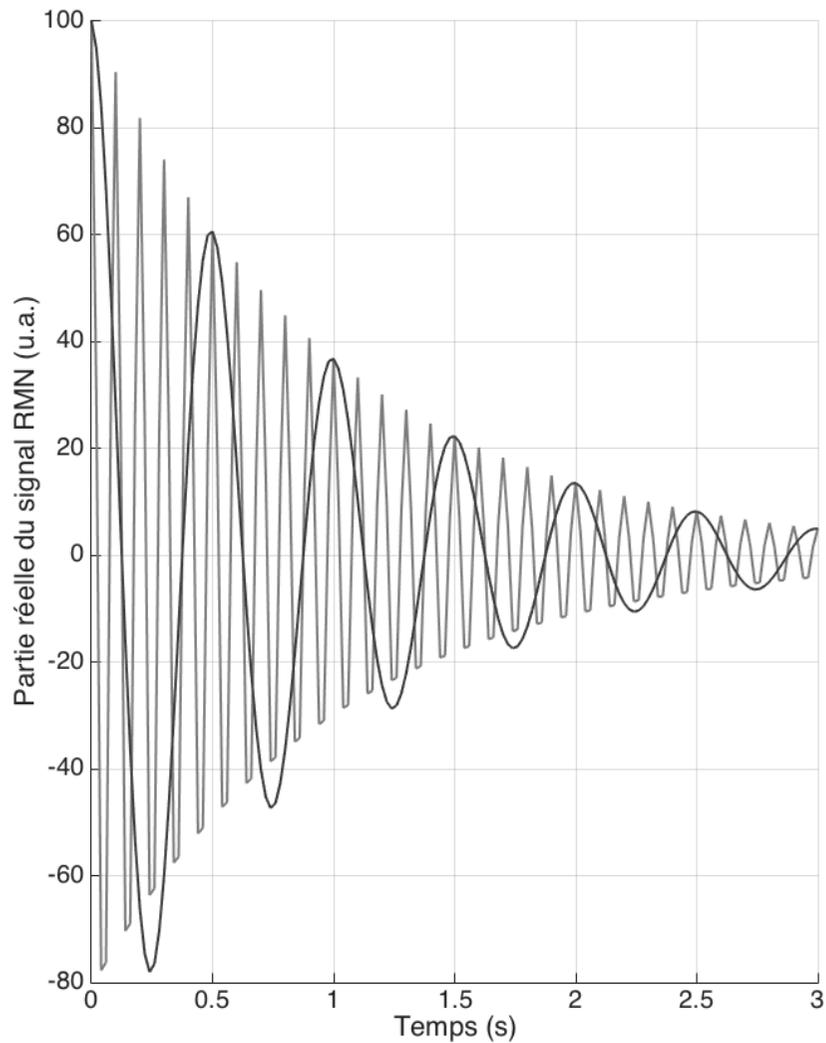
# Gradient et sélection spatial du signal



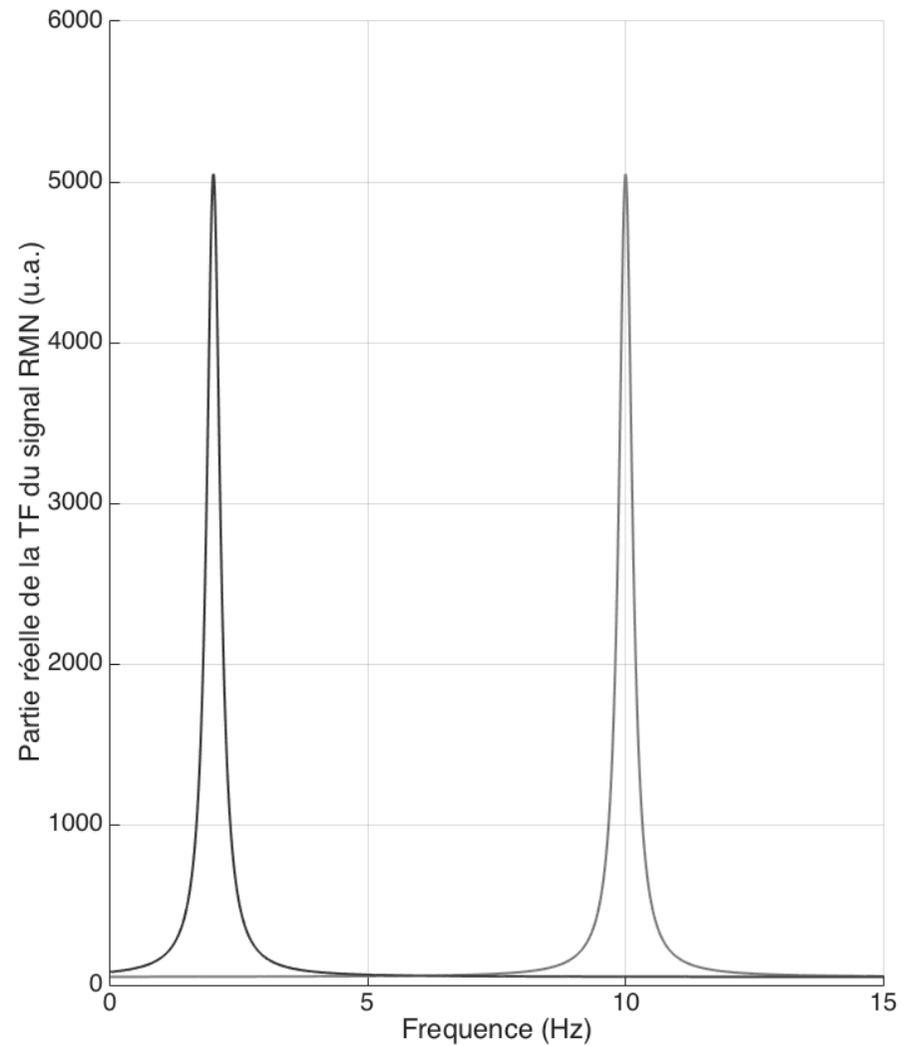
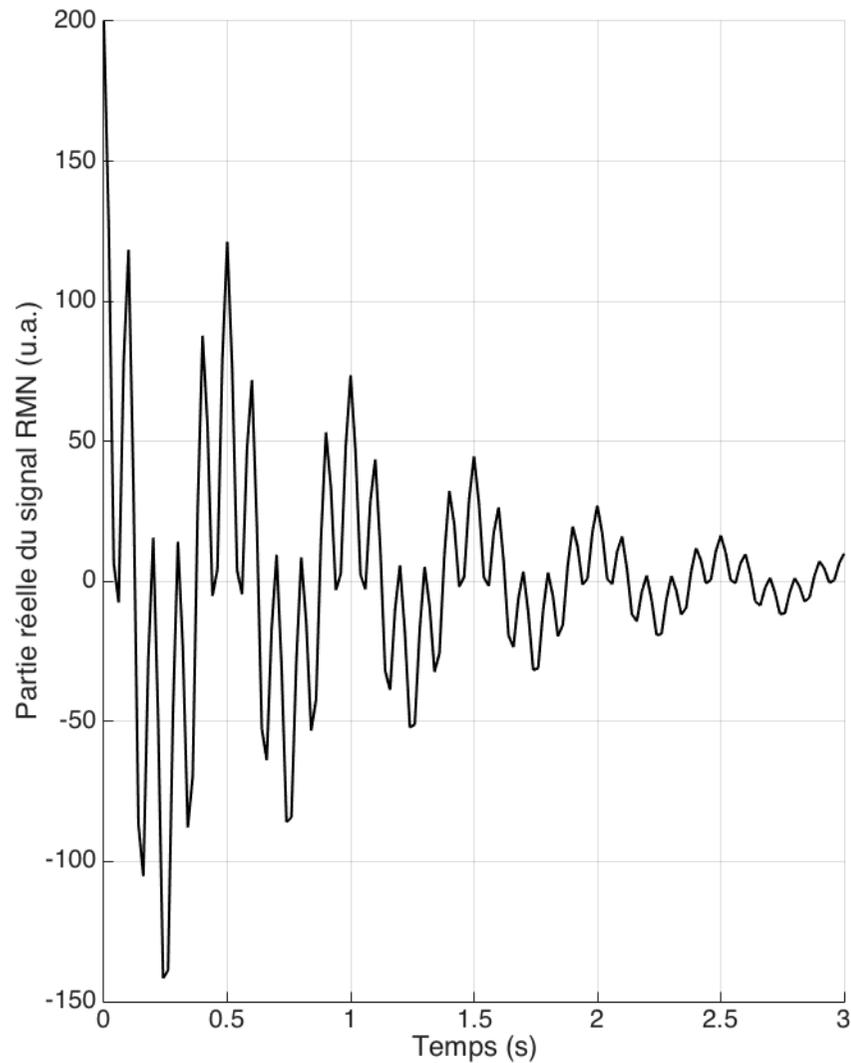
# Gradient et sélection spatial du signal



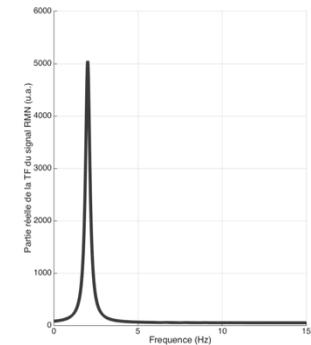
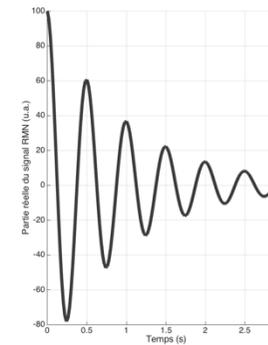
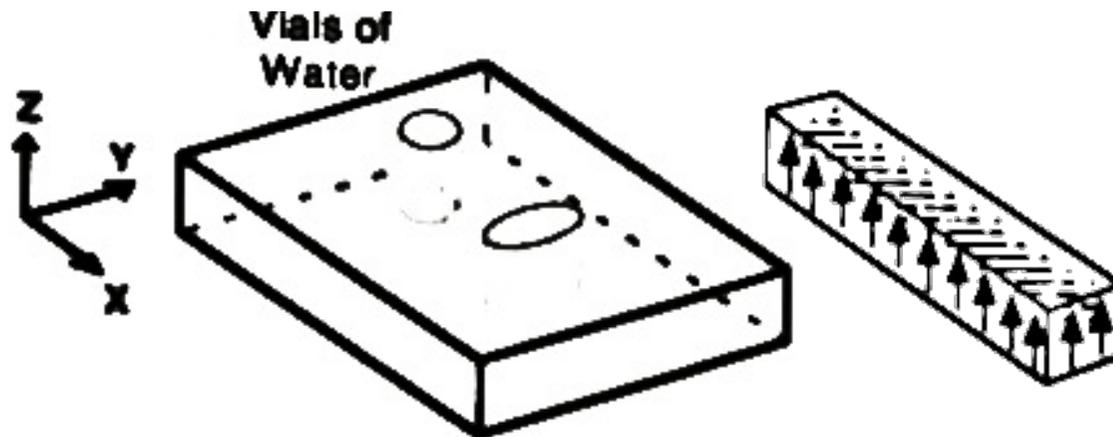
# Gradient et sélection spatial du signal



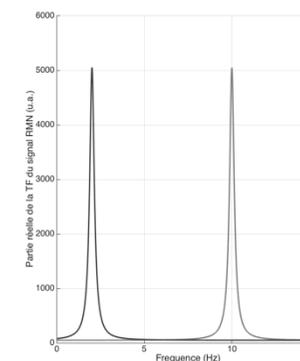
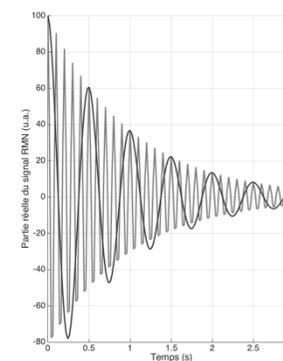
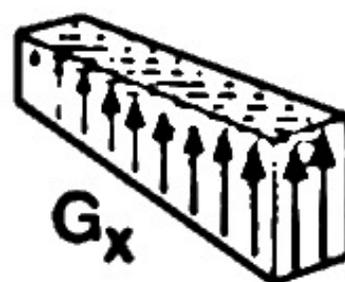
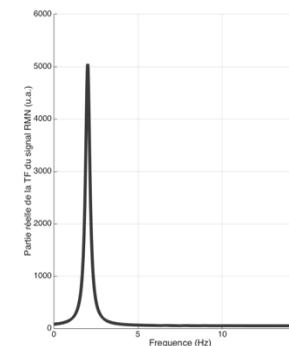
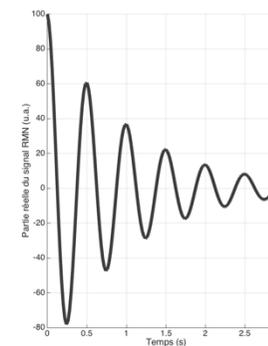
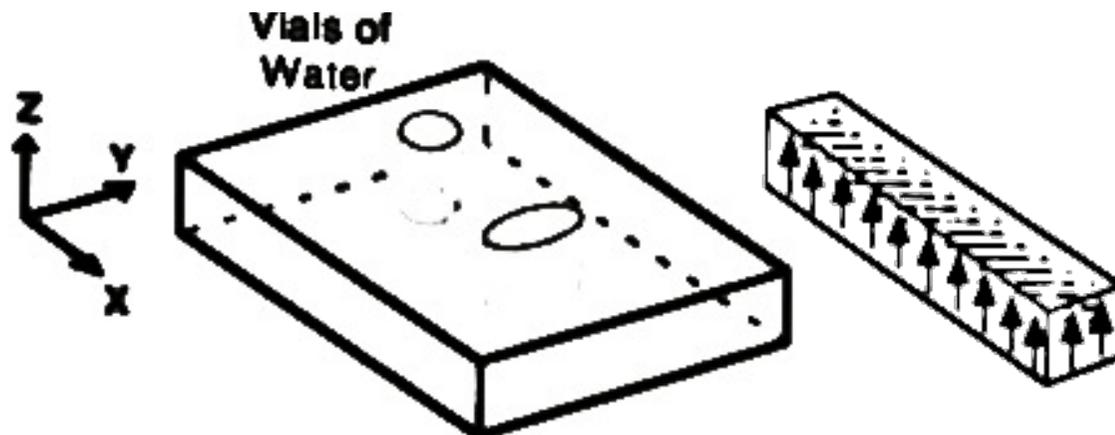
# Gradient et sélection spatial du signal



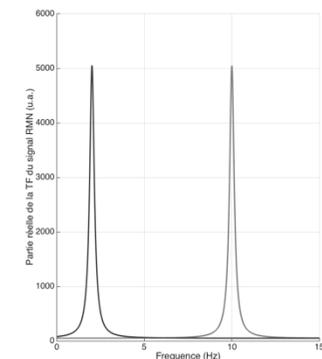
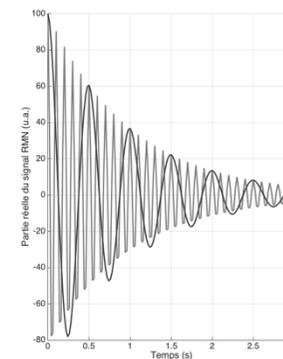
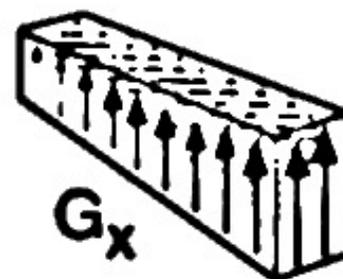
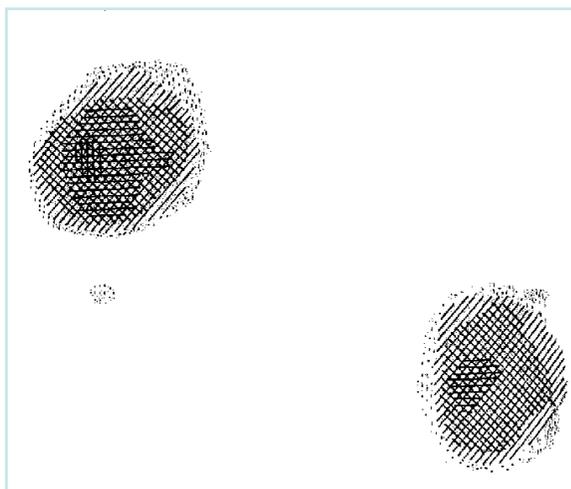
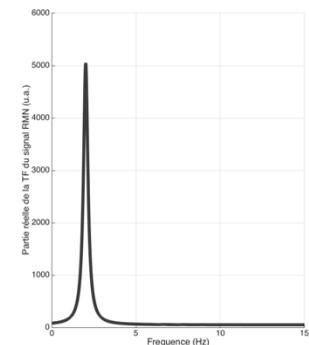
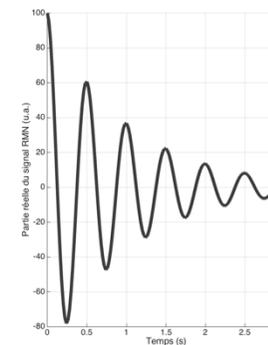
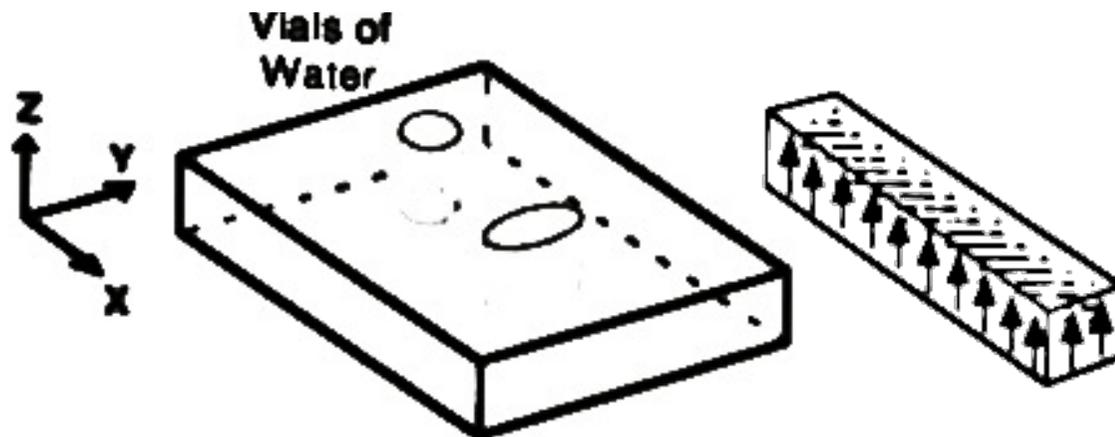
# Encodage de fréquence



# Encodage de fréquence

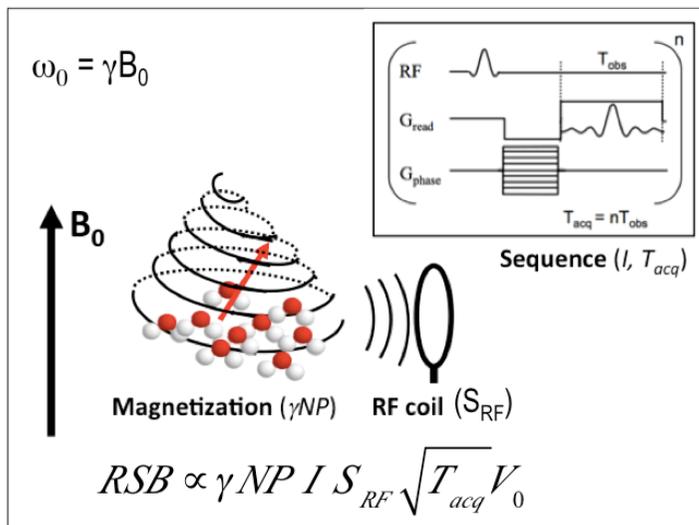


# Encodage de fréquence



Lauterburg, 1973, Nature

# Résumé l'IRM

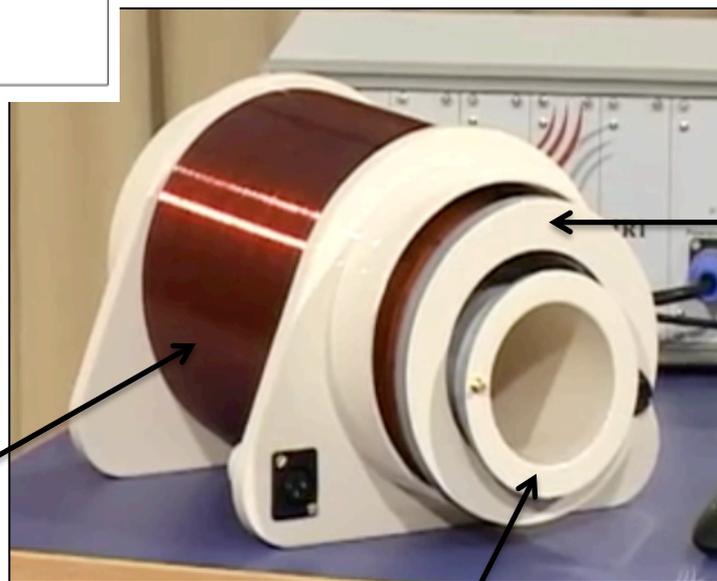


## Relaxation longitudinale ( $T_1$ )

$$M_z = M_0 \cos(\alpha) (1 - \exp(-t/T_1))$$

## Relaxation transversale ( $T_2$ )

$$M_{xy} = M_0 \sin(\alpha) \exp(-t/T_2) \sin(\omega_0 t)$$



Antenne RF

**Champ magnétique statique  $B_0$**  (Tesla)  
Precession des spins nucléaire à  
 $\omega_0 = \gamma B_0$   
**Pulsation de Larmor**

## Gradient de champ magnétique

Encode spatialement l'information

