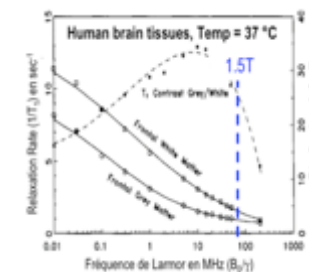
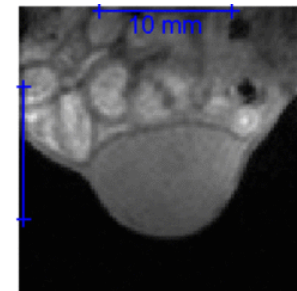
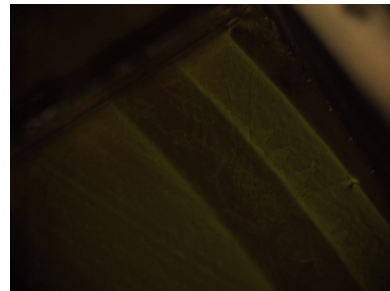
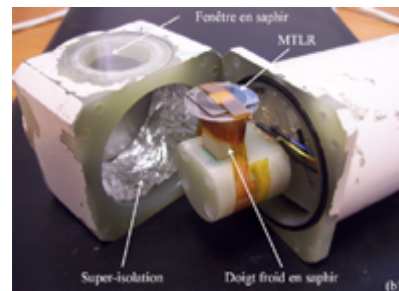
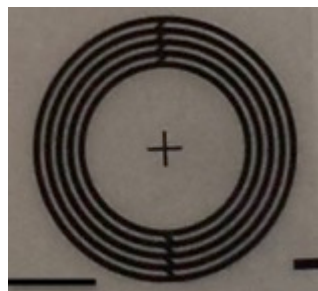


L'imagerie par Résonance Magnétique



UNIVERSITÉ
PARIS
SUD
Comprendre le monde,
construire l'avenir®

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

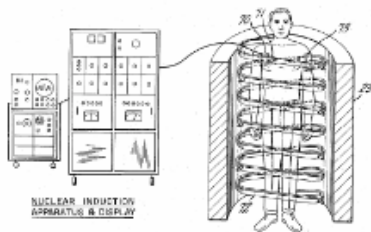
1977

1980

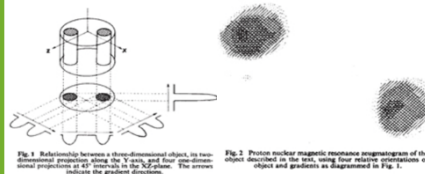
1992

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^{ère} image *in vivo* de l'anatomie humaine & Nobel en 2003).

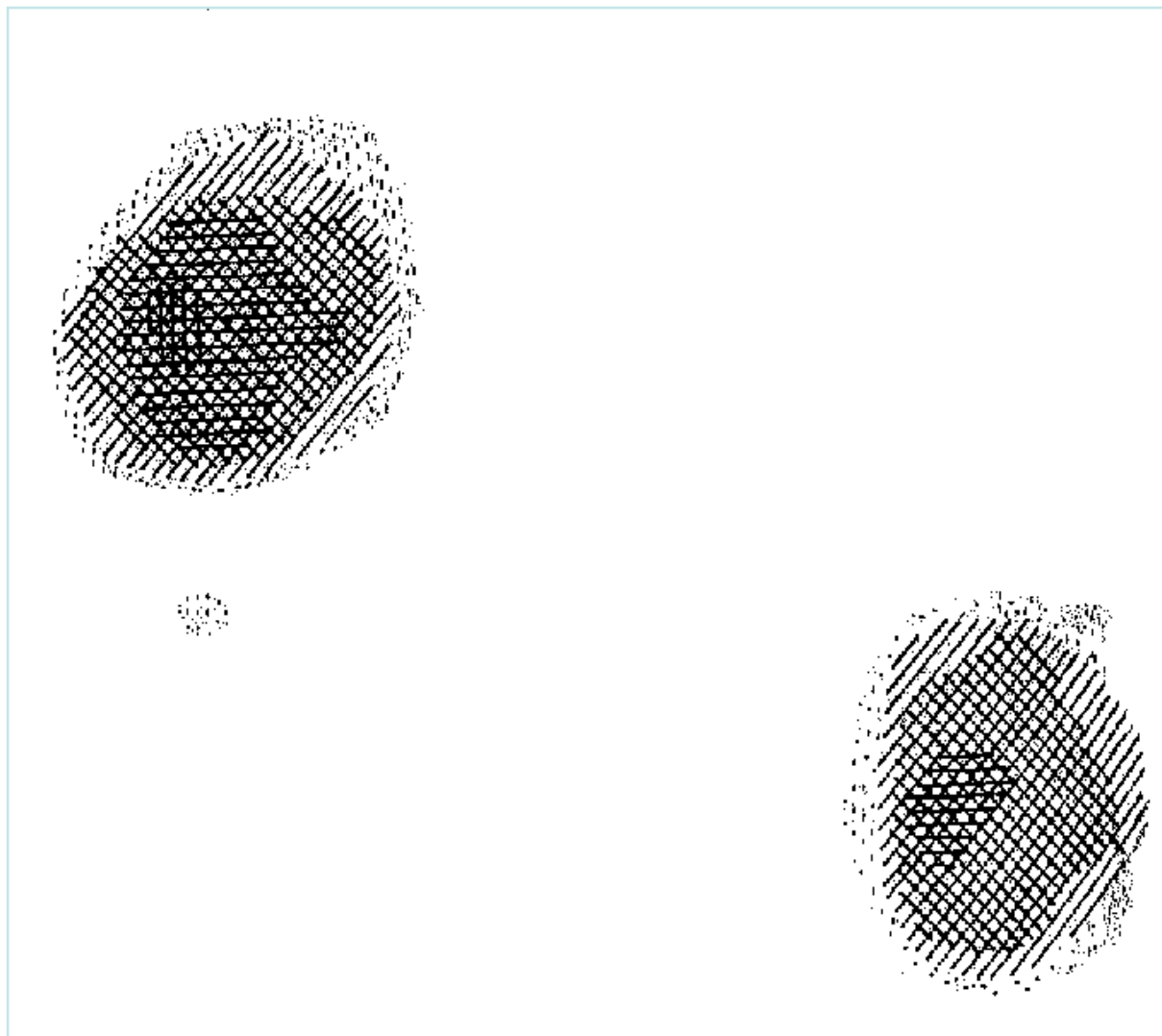
Damadian & FOMAR : 1^{er} IRM



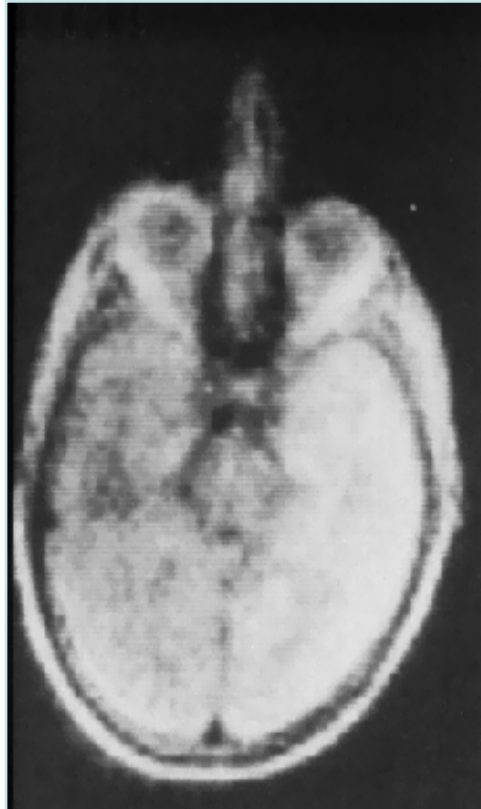
Importants développements : champs, gradients, antennes, séquences, logiciels.

1^{er} IRM 7T en France (Neurospin)

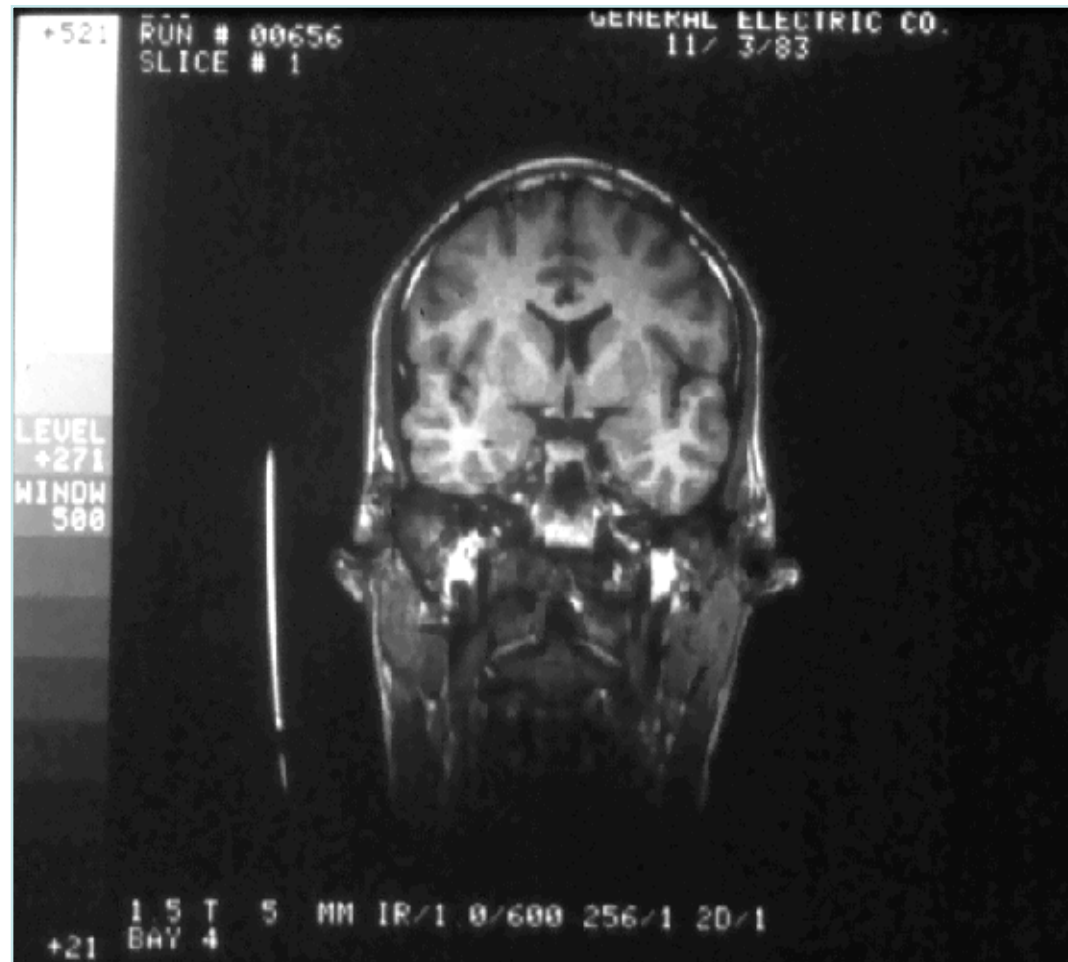
1973 : Première image (P.C. Lauterbur, Nature)



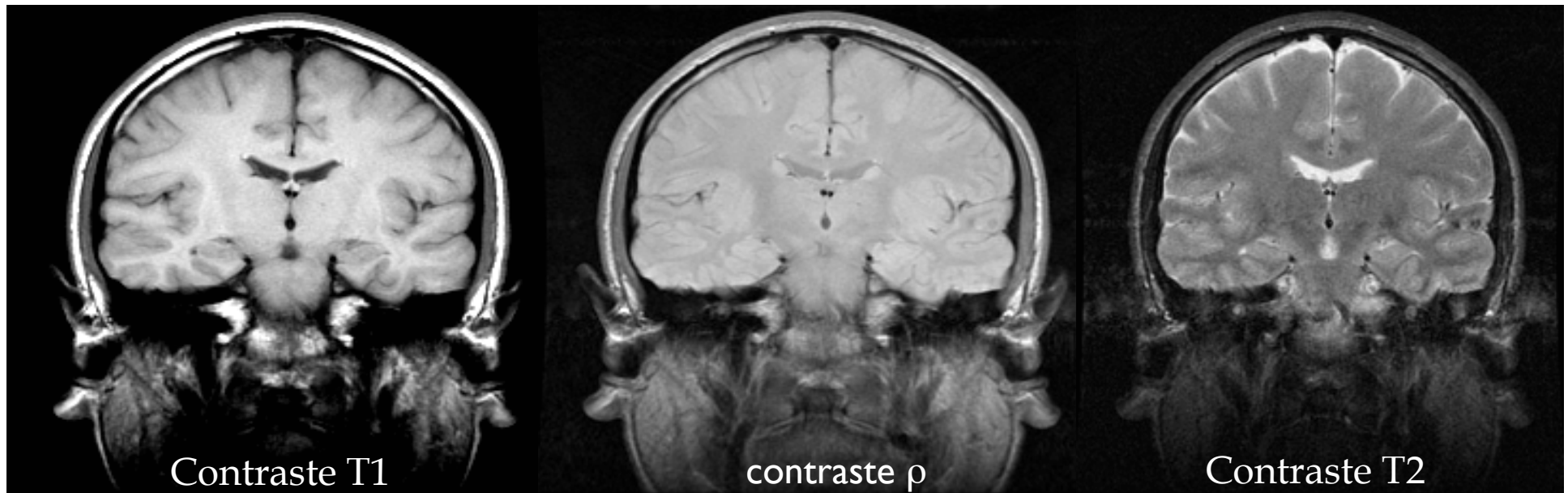
1979 : Premières images en multiples incidences : Moore et al.



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



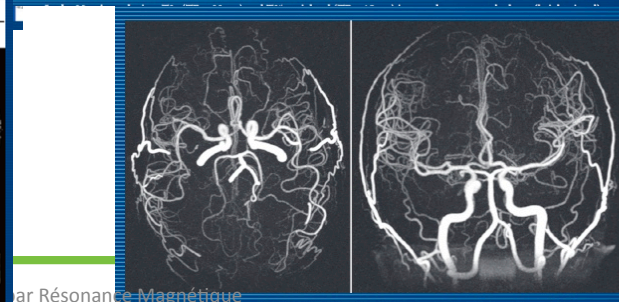
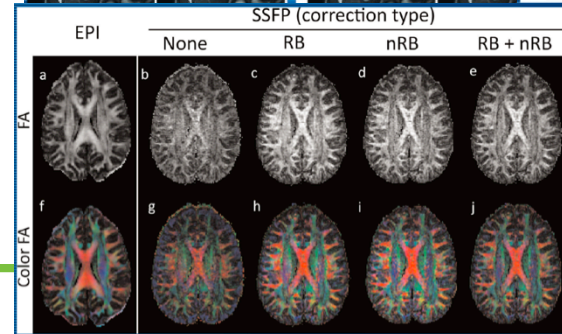
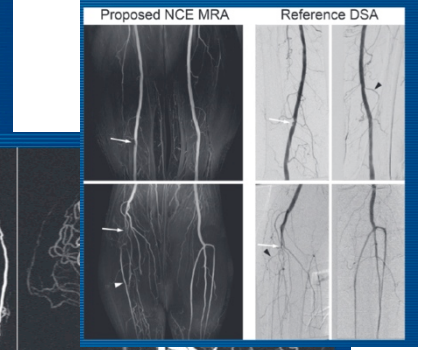
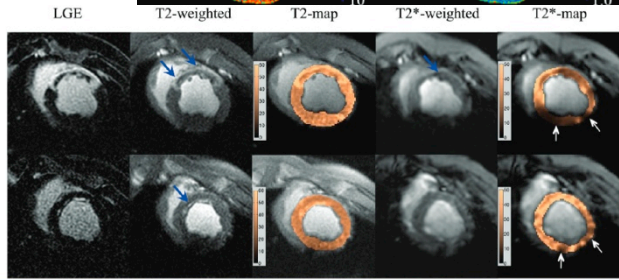
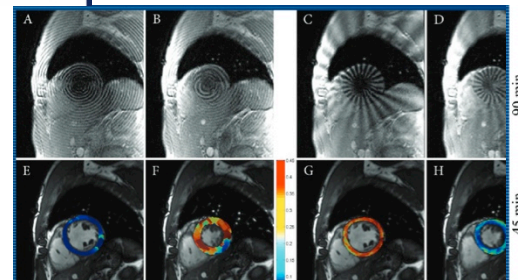
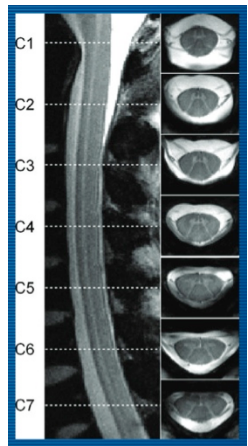
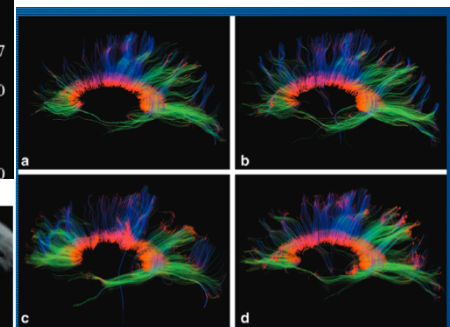
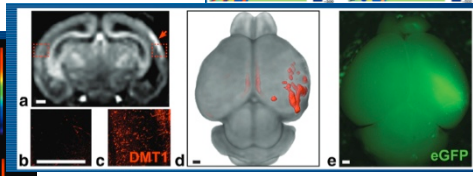
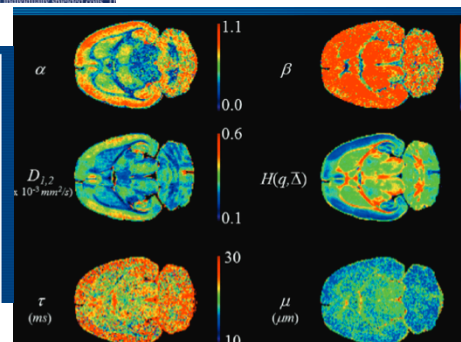
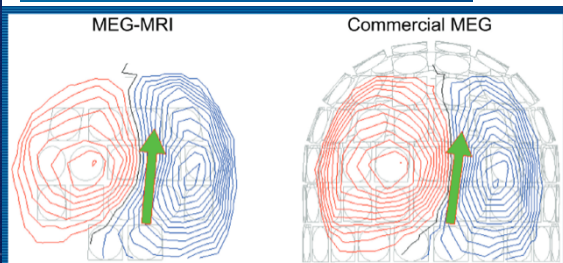
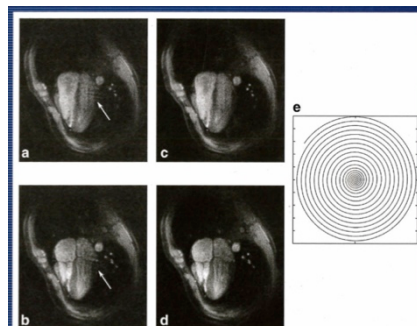
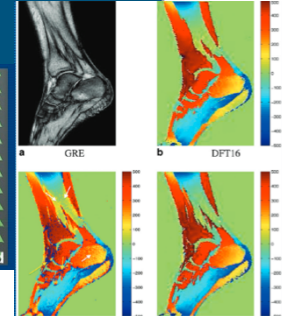
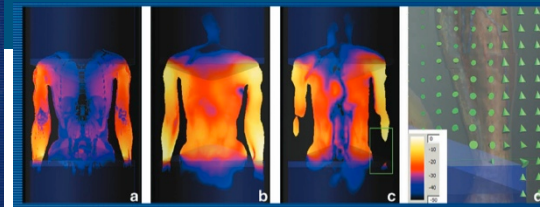
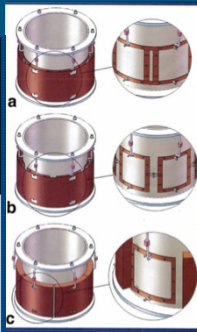
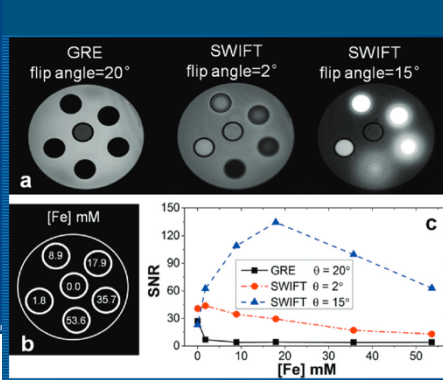
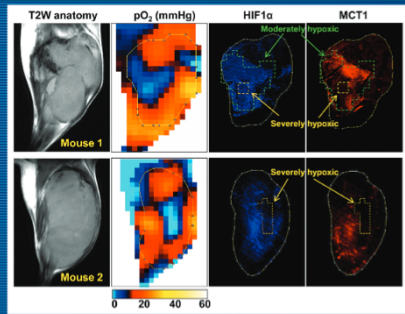
2005 @ 1,5 teslas (General Electric)



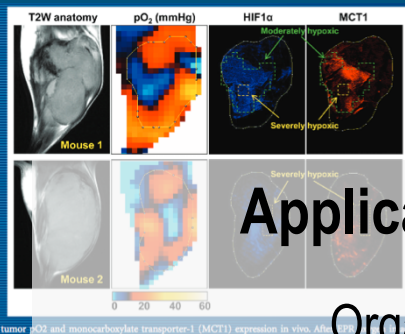
2000 : Spectromètre RMN 900 MHz (21 T)



Recherche en IRM – versatile



Recherche en IRM – versatile



Applications

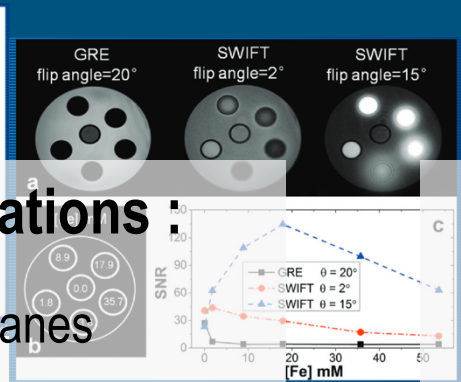
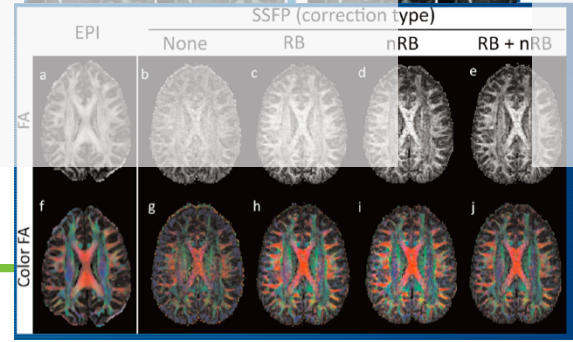
Organes

Pathologie

Structure

Fonction

moléculaire



Technologie et méthodologie:

Instrumentation - Antennes RF

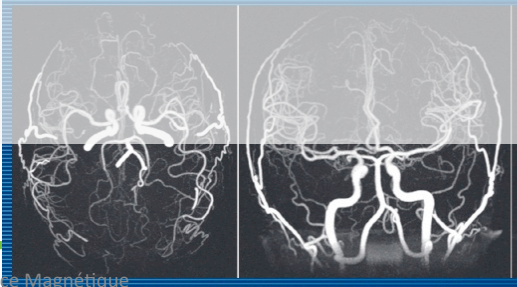
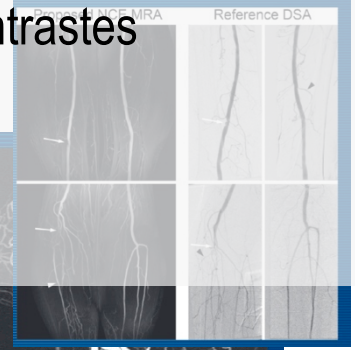
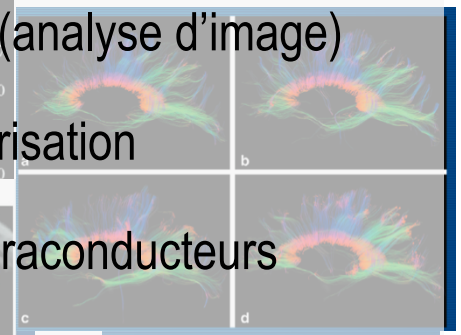
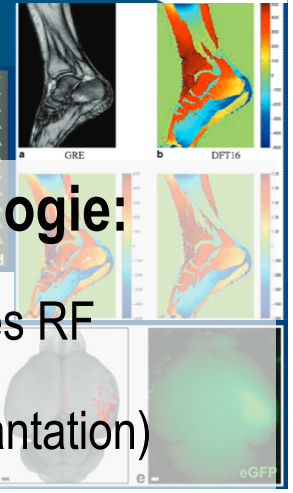
Séquences (Transfert d'aimantation)

Traitement de signal (analyse d'image)

Hyperpolarisation

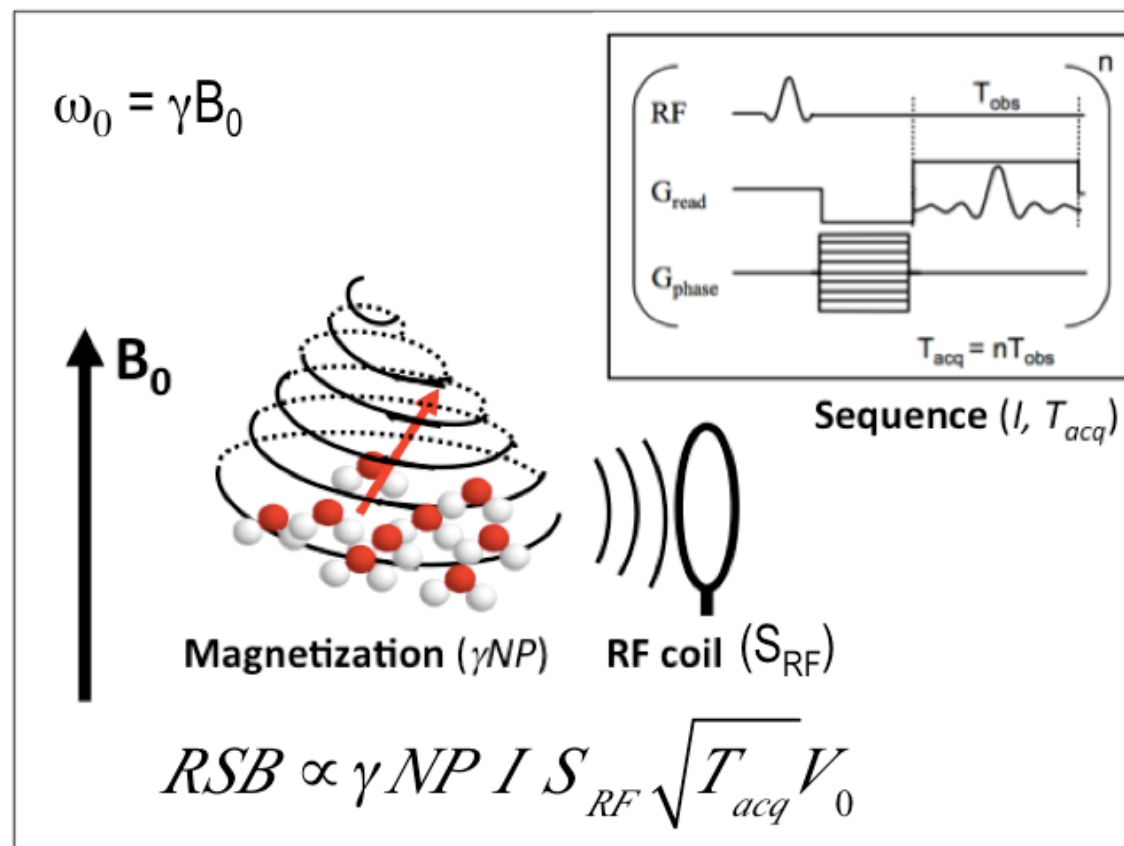
Physique des supraconducteurs

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).

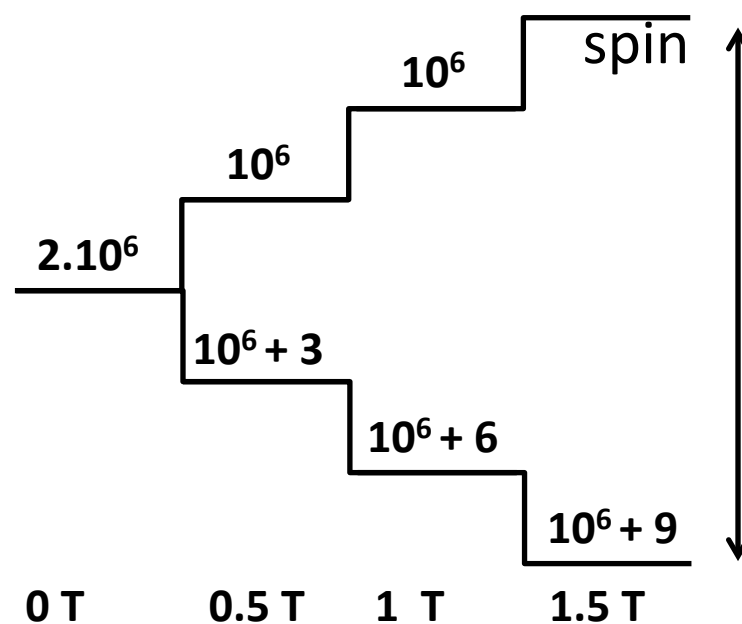
Le moment magnétique TOTAL d'un échantillon est donc NUL.

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

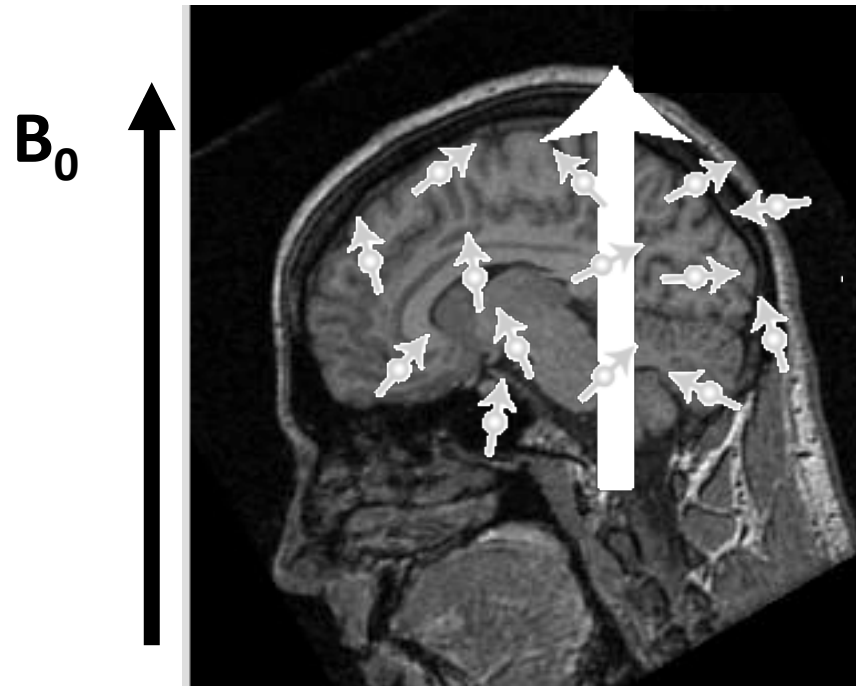
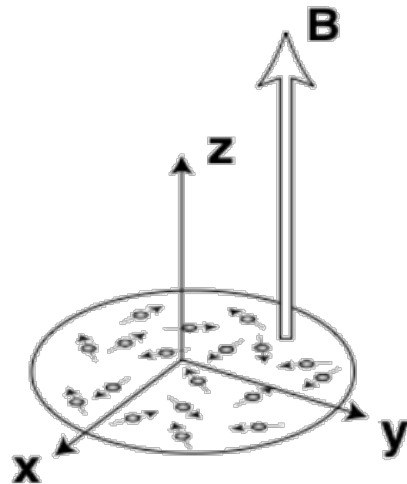
M_0 aimantation macroscopique
 ρ densité de proton
 χ Susceptibilité magnétique

B_0



À l'équilibre thermodynamique

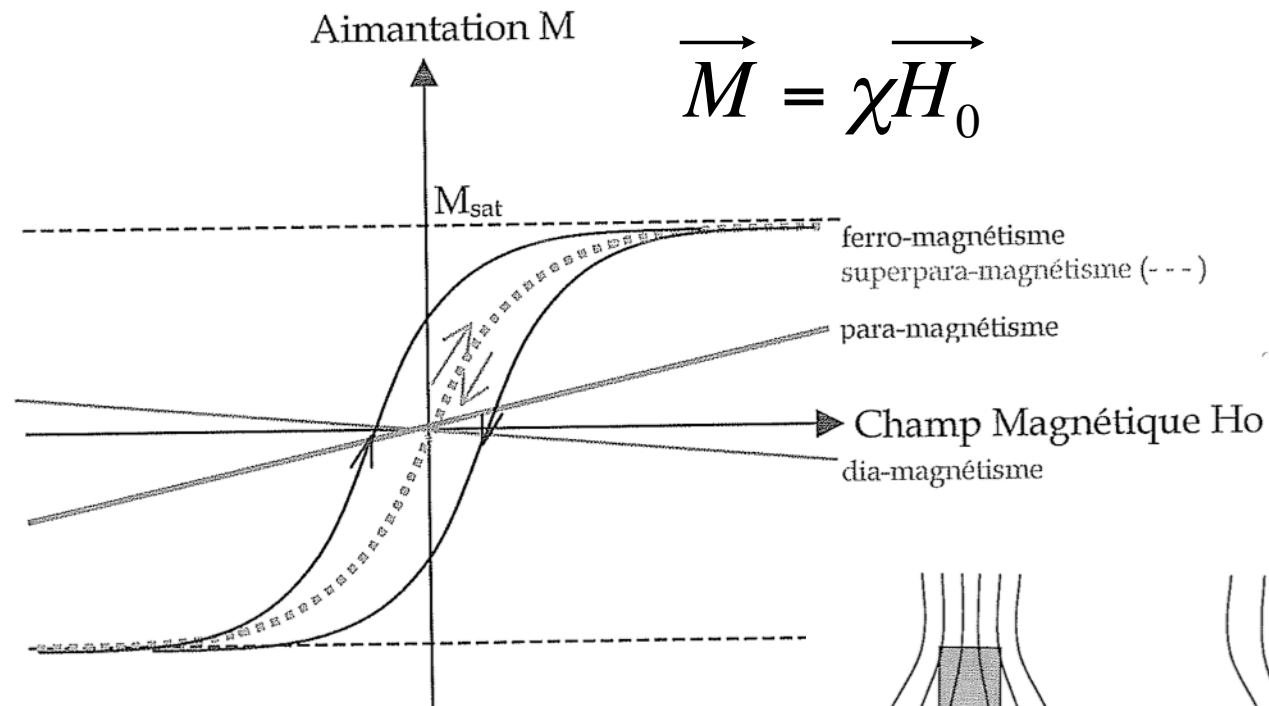
Aimantation Macroscopique



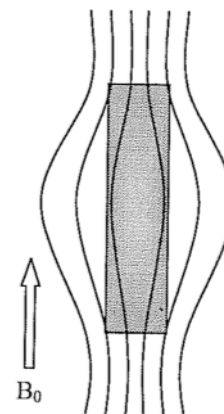
Pas de cohérence
Pas de composante transversale

À l'équilibre thermodynamique

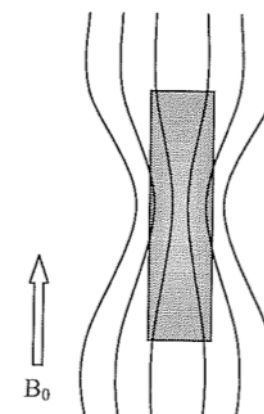
Comportement magnétique de la matière



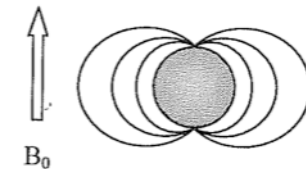
Diamagnétisme: $\chi < 0$,
Paramagnétisme: $\chi > 0$
Super paramagnétisme



$\chi \approx -10^{-6}$
Diamagnétisme

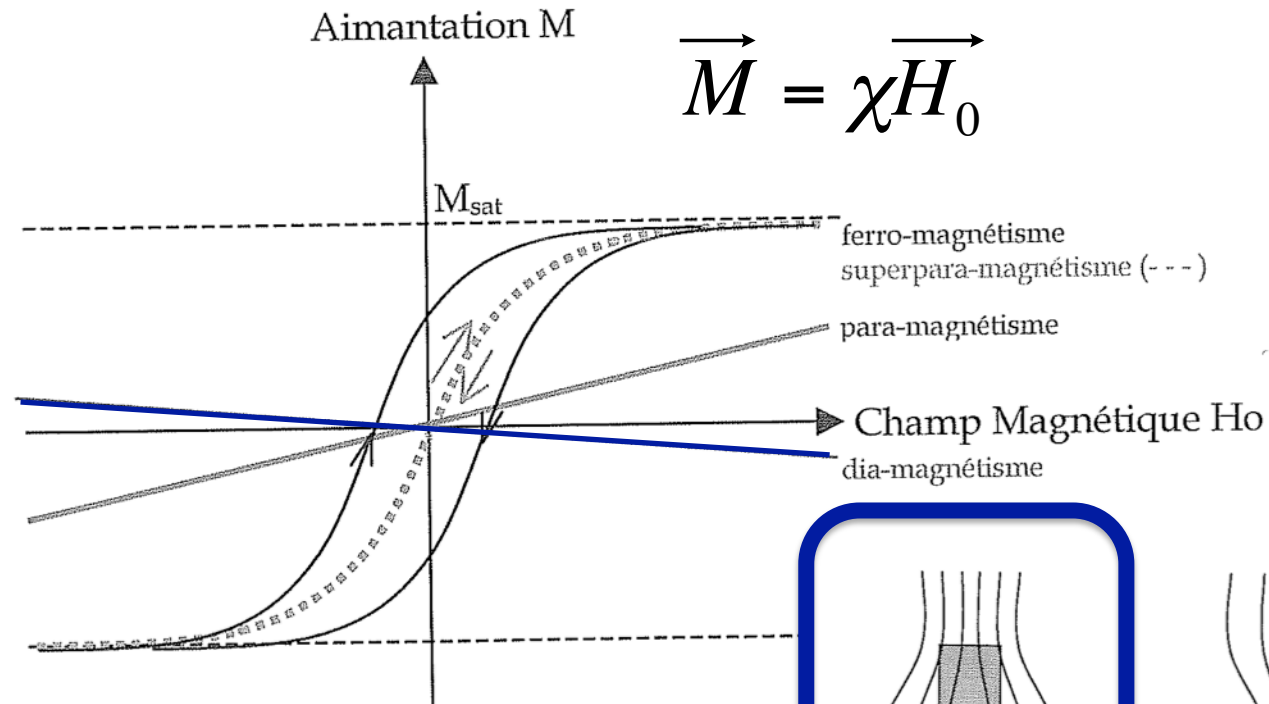


$\chi \approx +10^{-5} \text{ à } 10^{-3}$
Paramagnétisme

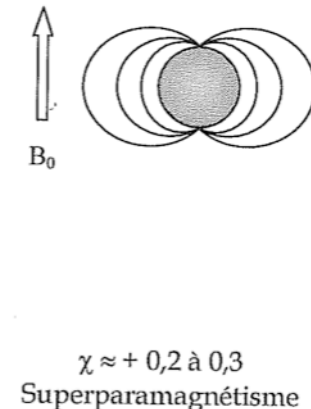
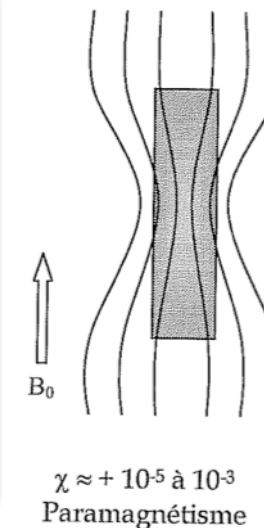
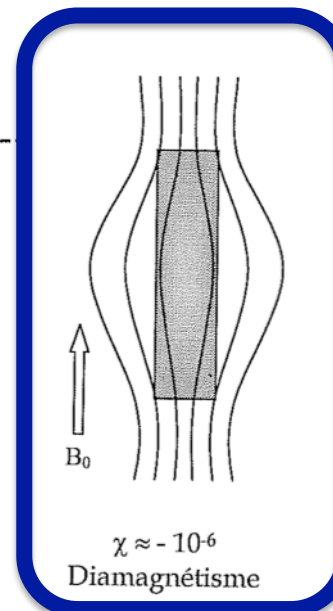


$\chi \approx +0,2 \text{ à } 0,3$
Superparamagnétisme

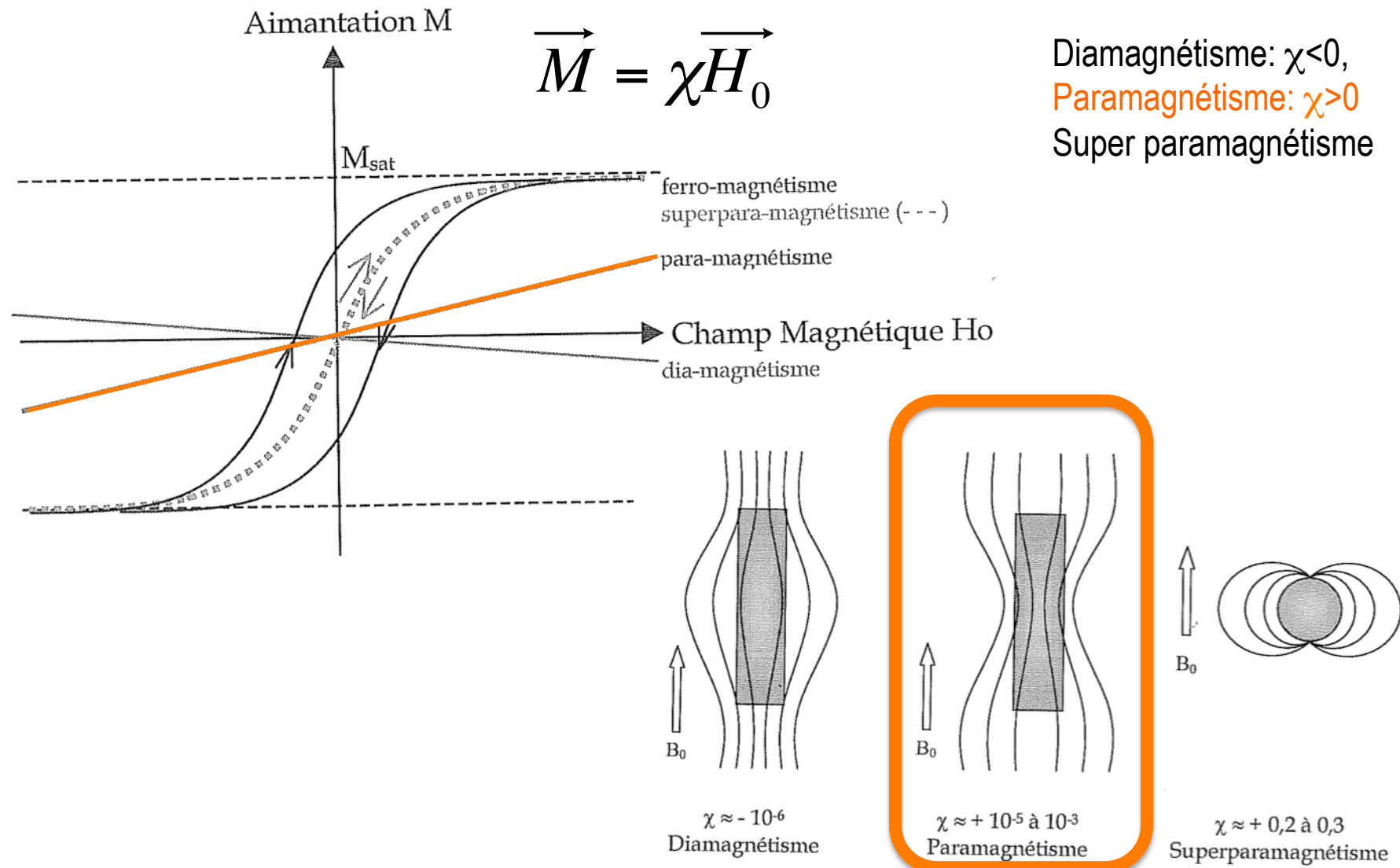
Comportement magnétique de la matière



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



Comportement magnétique de la matière



Comportement magnétique de la matière

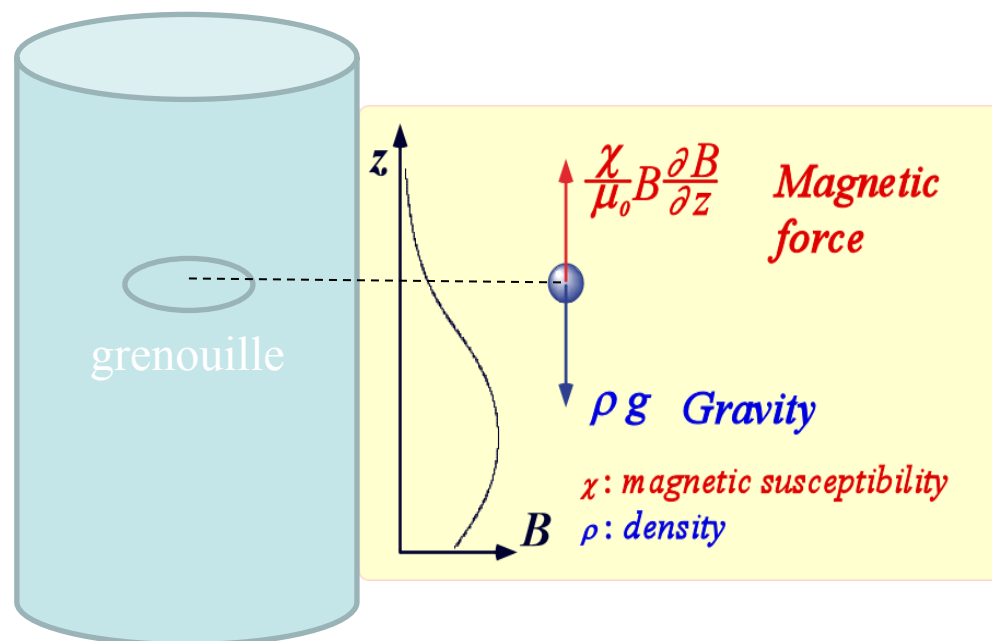
$$\vec{M} = \chi \vec{H}_0$$

Matériau	χ_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		
O₂	$0,19 \times 10^{-5}$		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>



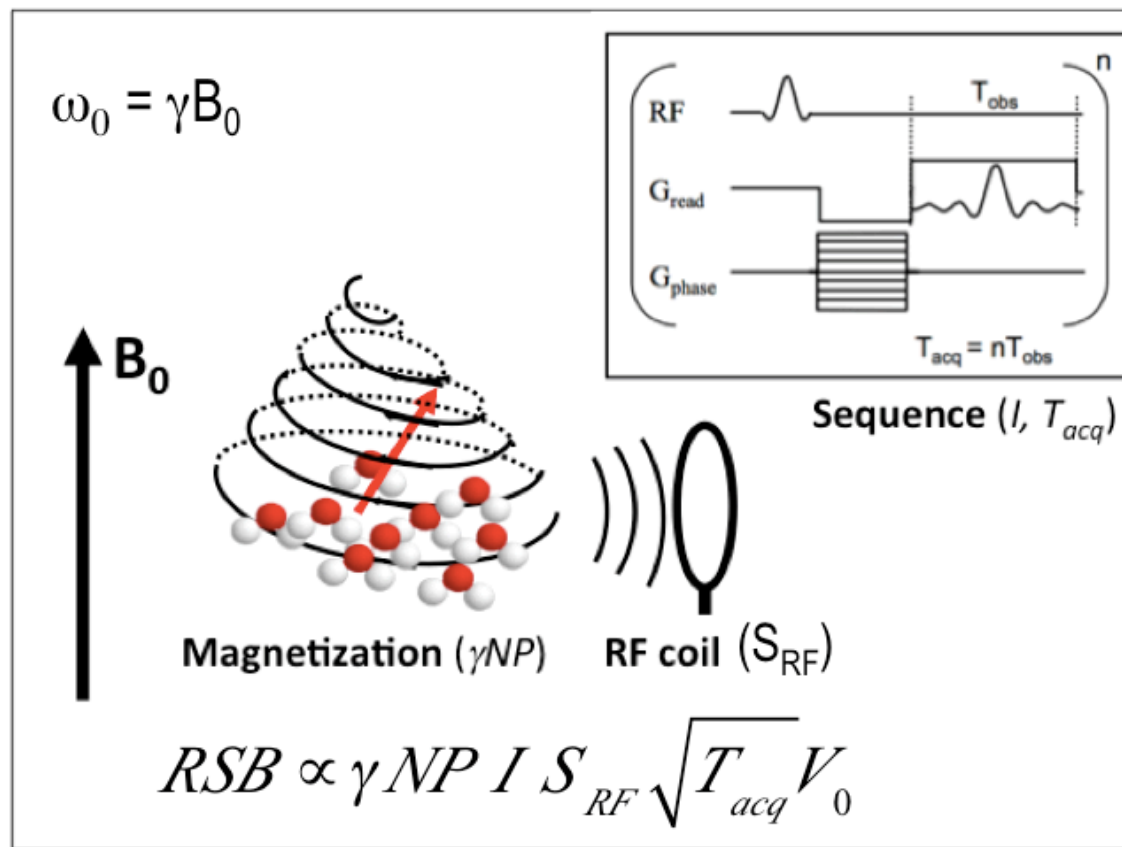
A live frog levitates inside a 32 mm diameter vertical bore of a Bitter solenoid in a magnetic field of about 16 teslas at the Nijmegen High Field Magnet Laboratory Netherlands (André Geim, IgNobel 2000)

André Geim and K. Novoselov
Nobel price 2010 on graphene

Résonance Magnétique Nucléaire en résumé

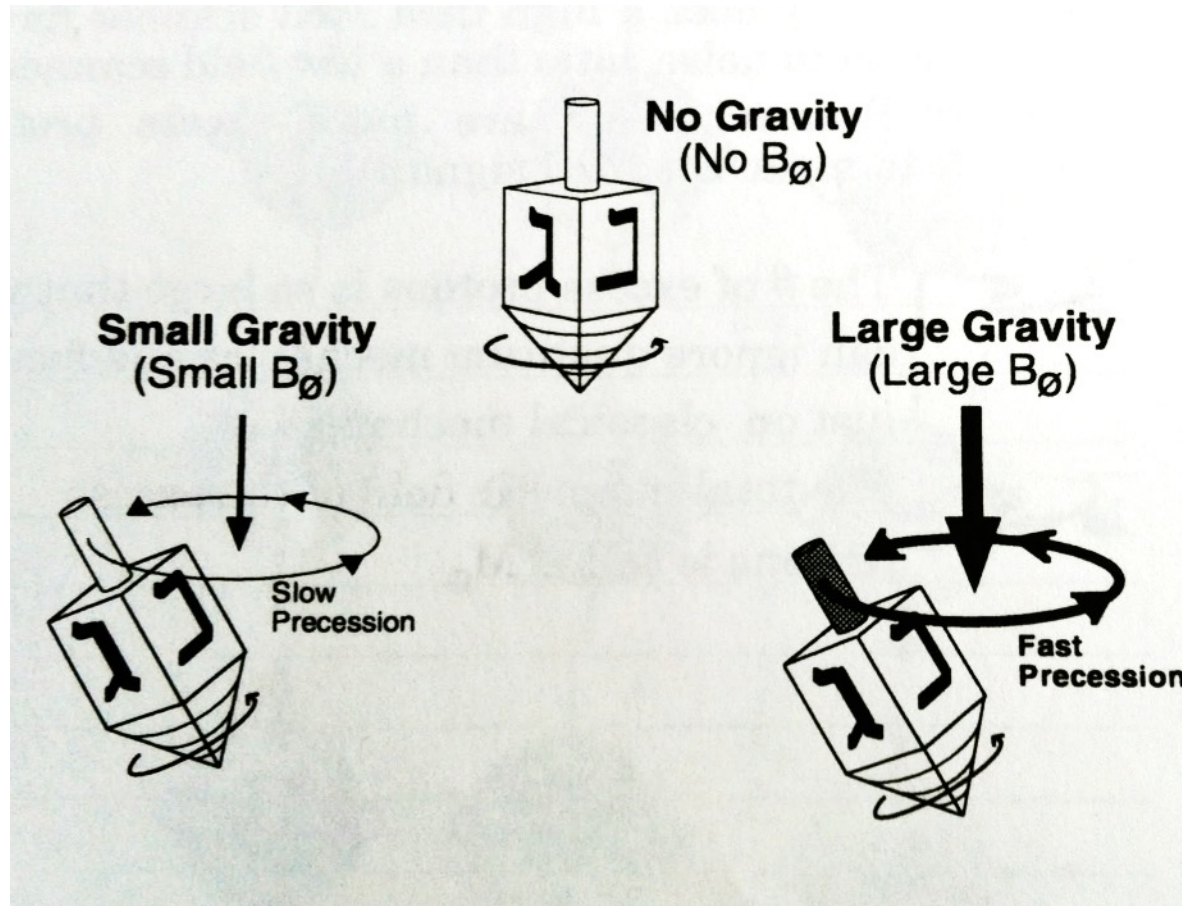
polarisation

résonance



Quand le proton se prend pour une toupie

quand il precesse



Fréquence de Larmor $\omega_0 = \gamma B_0$

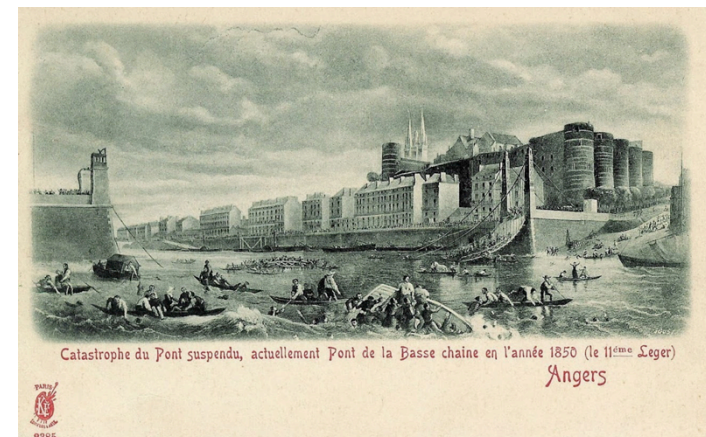
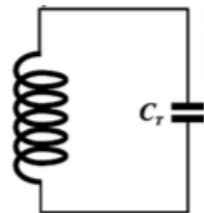
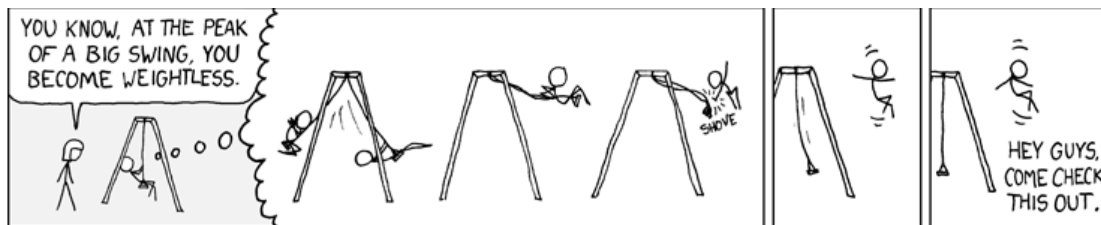
Coeff gyromagnétique
 $\gamma^1\text{H} = 42.56 \text{ MHz/T}$

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.

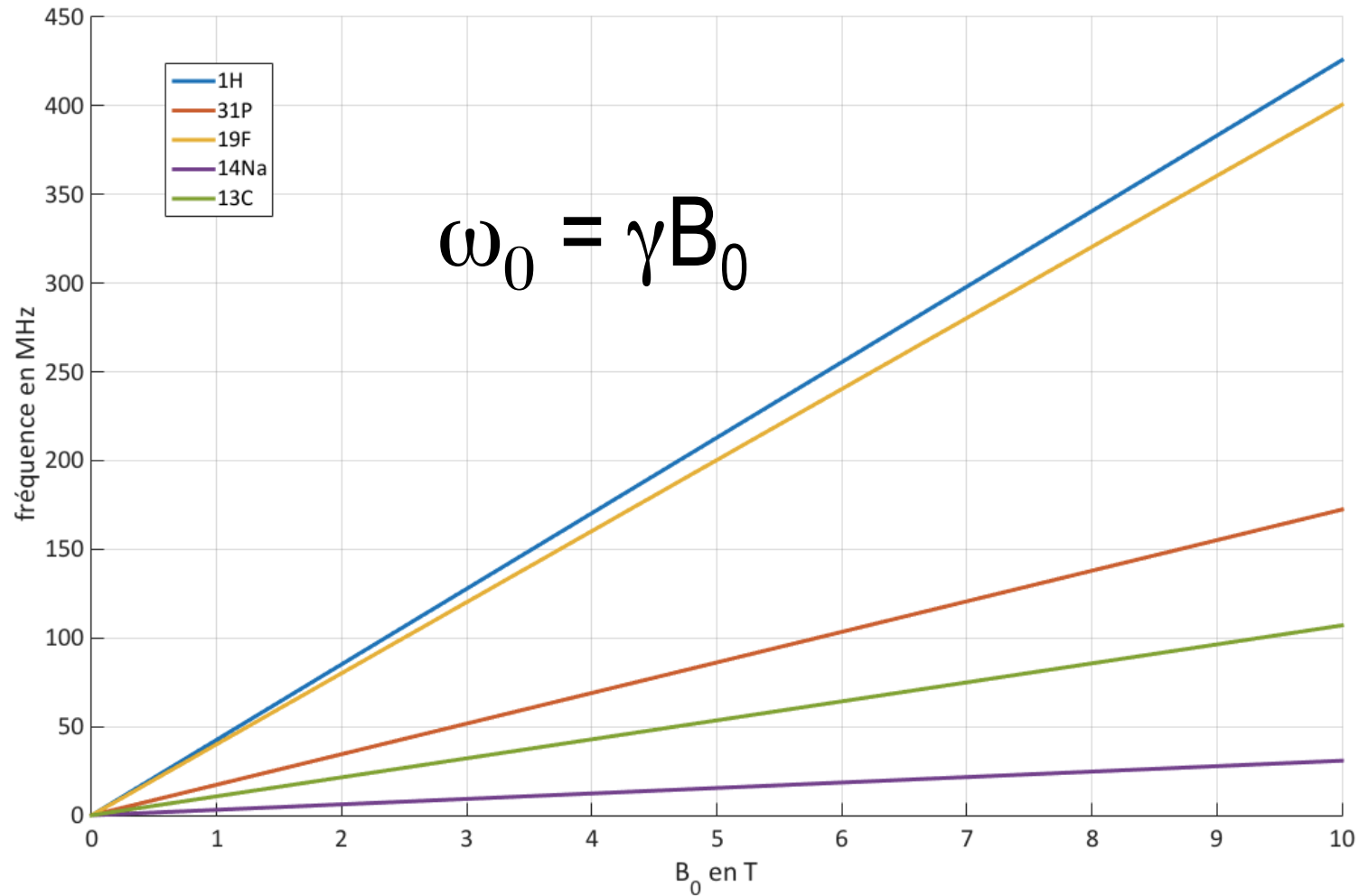
Quelle est la fréquence de Larmor d'un proton soumis à ce champ magnétique ? On rappelle que la fréquence de précession d'un proton soumis à un champ magnétique de 1 T est de 42,57 MHz.

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

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



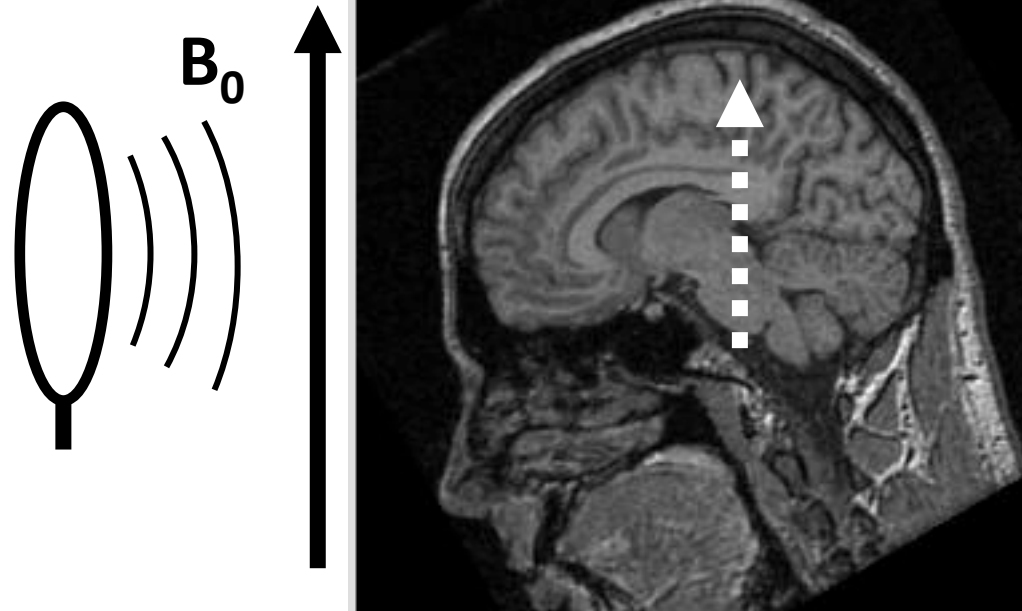
Description de la RMN

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 B1 intense, perpendiculaire à B0 et de fréquence ν_1) pendant un temps très court.
- Cette impulsion RF doit respecter la condition de résonance: $\omega_1 = \omega_0$.

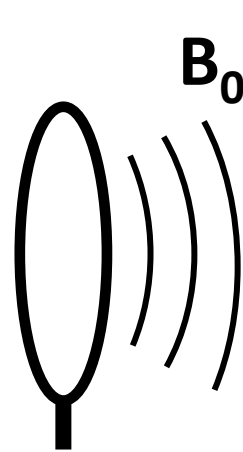
Excitation des spins

champ B_1 RF intense,
perpendiculaire à B_0 et de
fréquence ω_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 $\alpha = \gamma B_1 \tau$, τ durée de l'impulsion RF

Impulsion RF

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

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

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

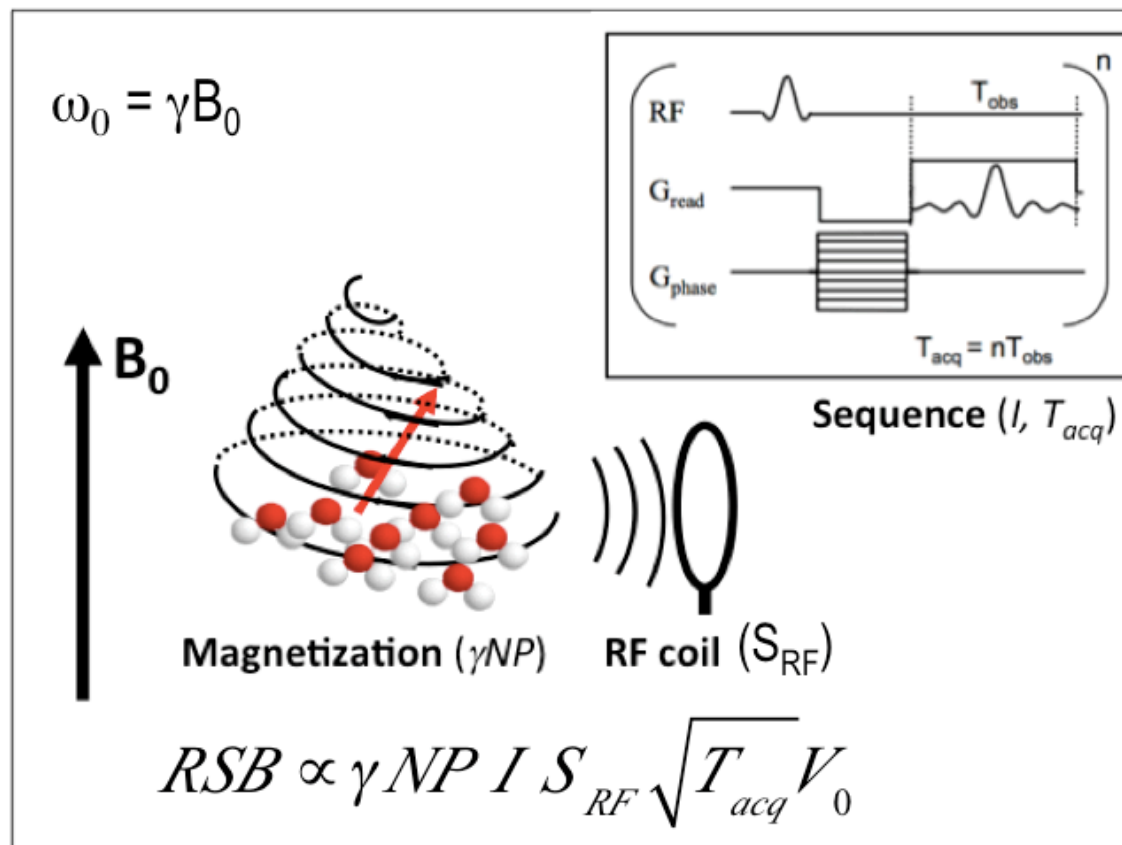
$$B_1 = \pi$$

Résonance Magnétique Nucléaire en résumé

polarisation

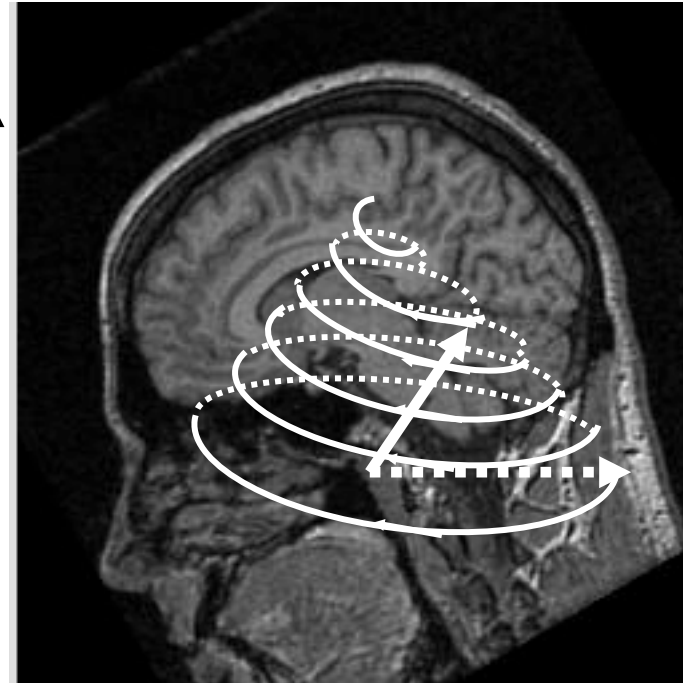
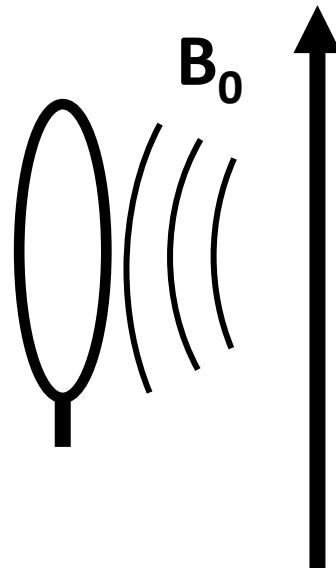
résonance

relaxation



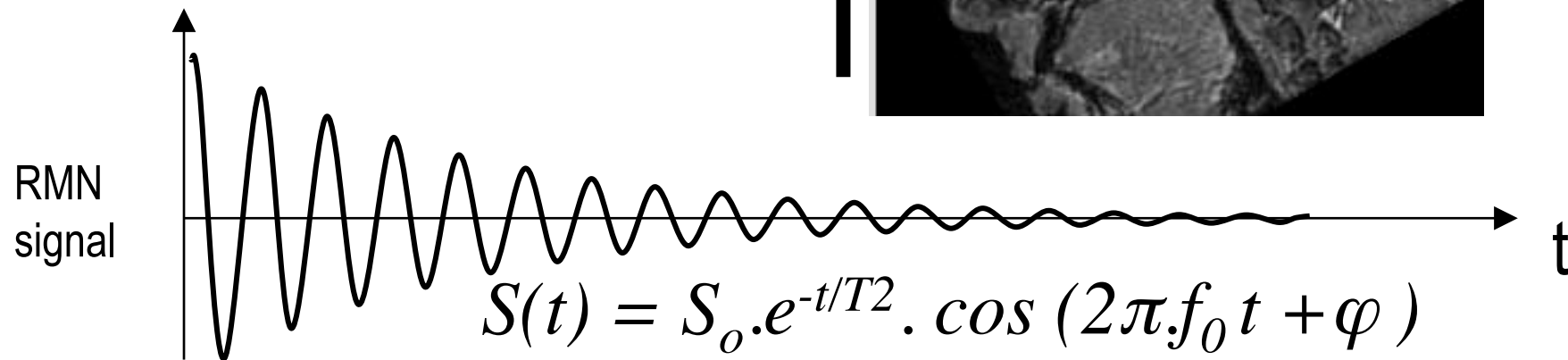
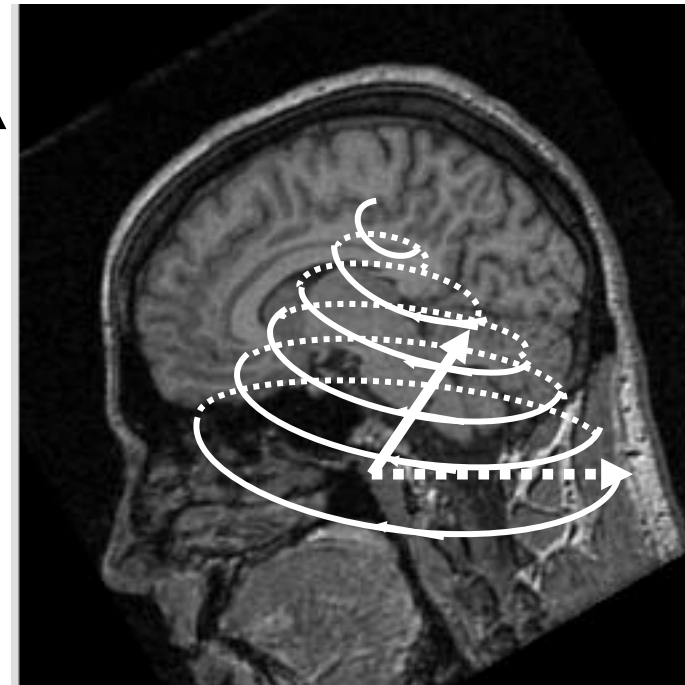
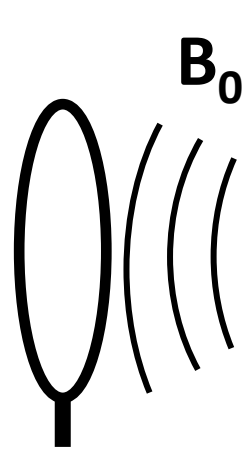
Précession libre et relaxation

$$\omega_0 = \gamma B_0$$



Précession libre et relaxation

$$\omega_0 = \gamma B_0$$



Description de l'aimantation

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

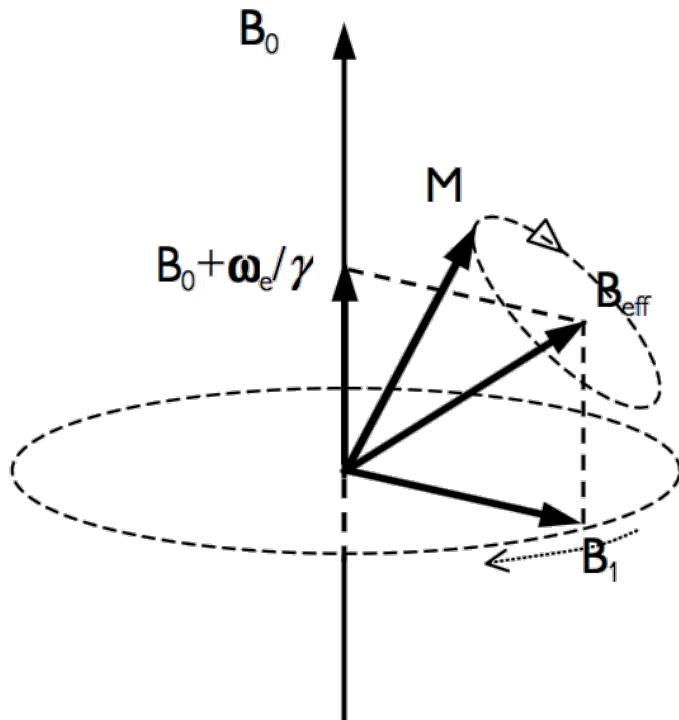
Équations de Bloch

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

B_0 Champ magnétique statique

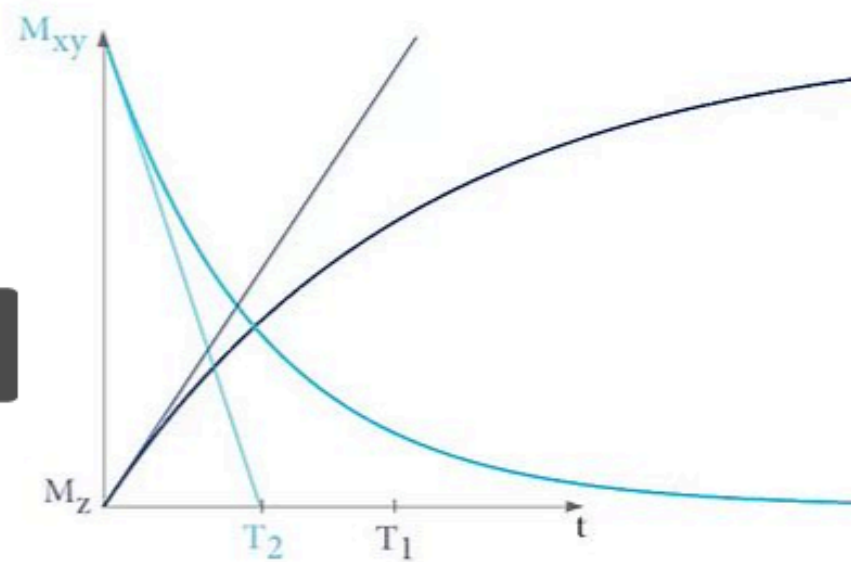
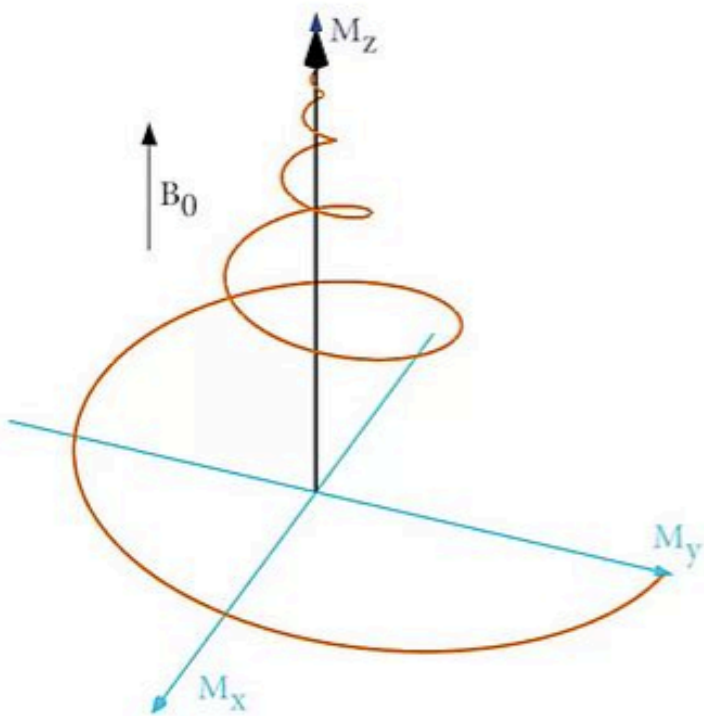
M Aimantation macroscopique

B_1 Champ de radiofréquence

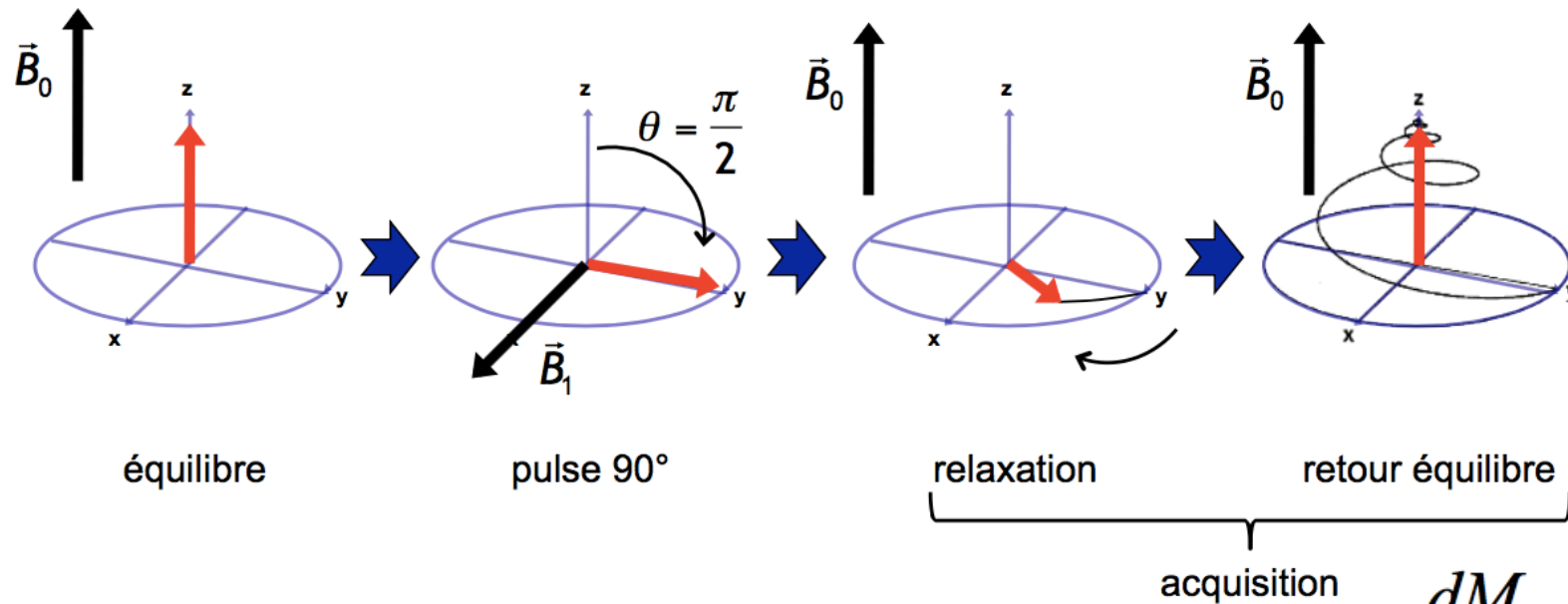


NB: si $B_{\text{eff}} = B_0$ M précesse autour de B_0

Proton_spin_MRI.webm



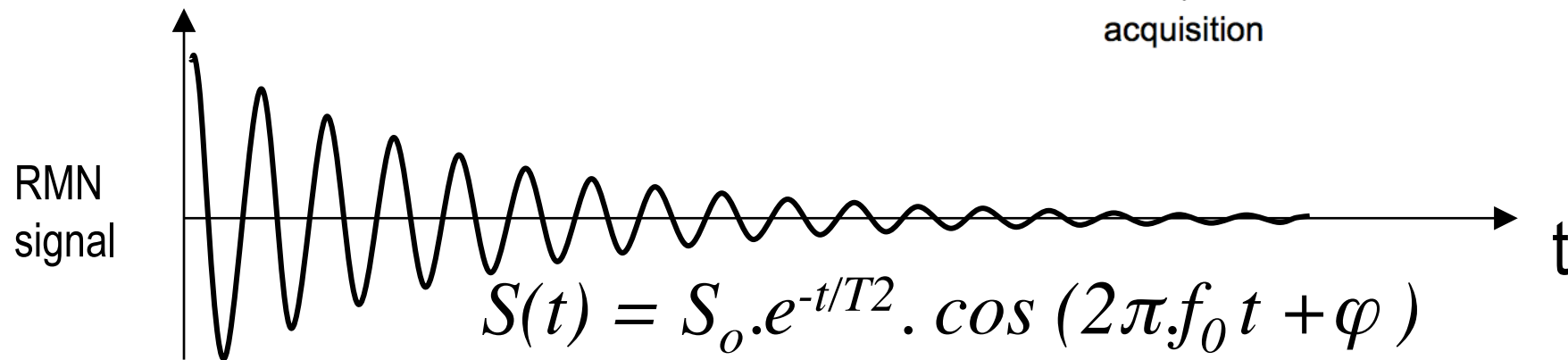
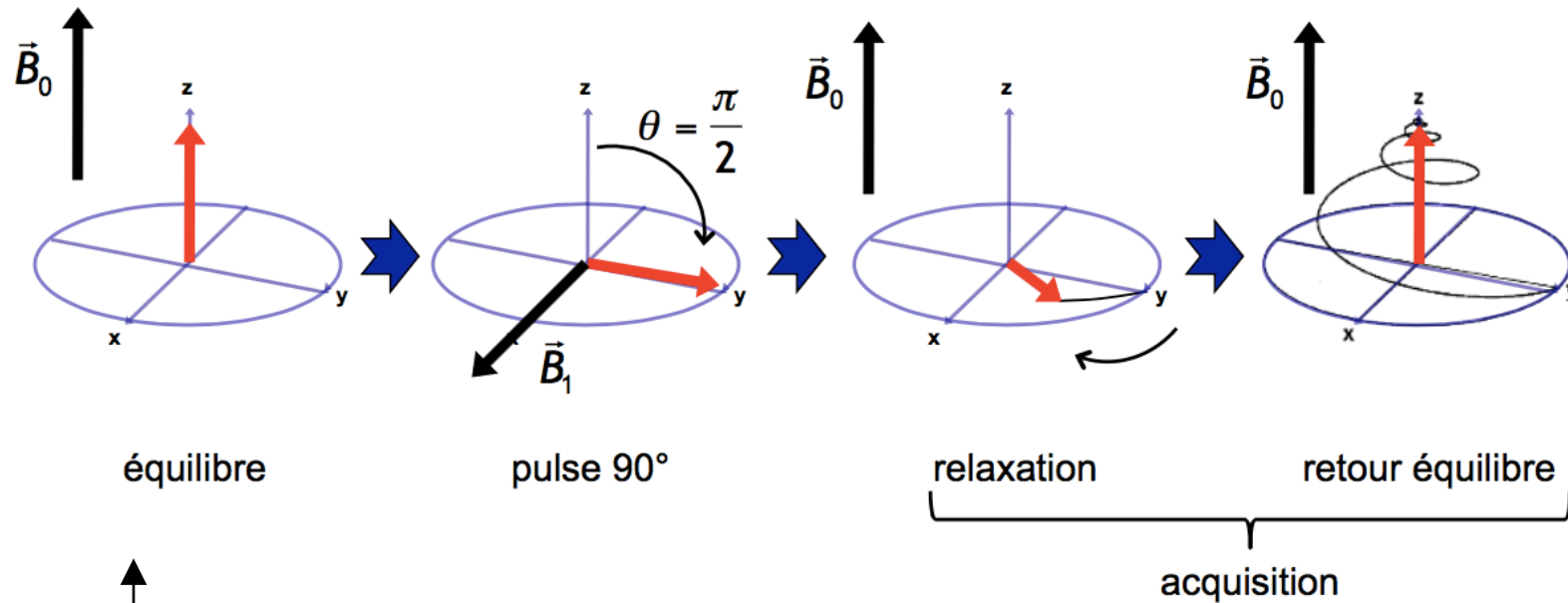
Plan transverse - Free Induction Decay FID



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

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

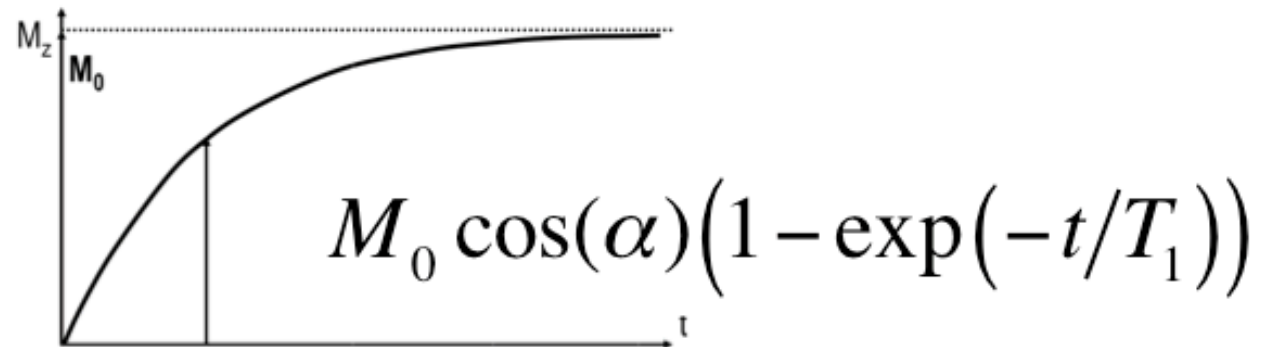
Plan transverse - Free Induction Decay FID



Plan longitudinal - Relaxation Longitudinale et T1

z
↑

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



Notions de relaxivité

- Pour relaxer, ^1H doit rencontrer un champ magnétique fluctuant B_{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 τ_c (\sim temps moyen mis par une molécule pour pivoter d'un radian)

Relaxation T1

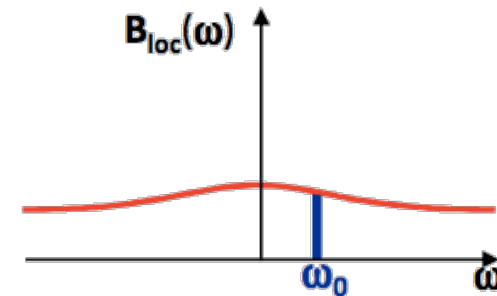
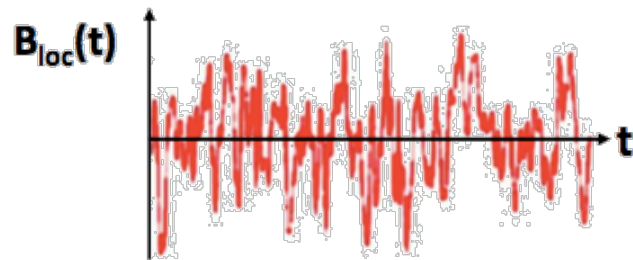
- Seul dans le vide : plus de 1000...0 ans
- Proche d'un autre proton : quelques secondes
- proche d'un électron : quelques microsecondes

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_{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 ($-1/2 \gamma \hbar B_0$).

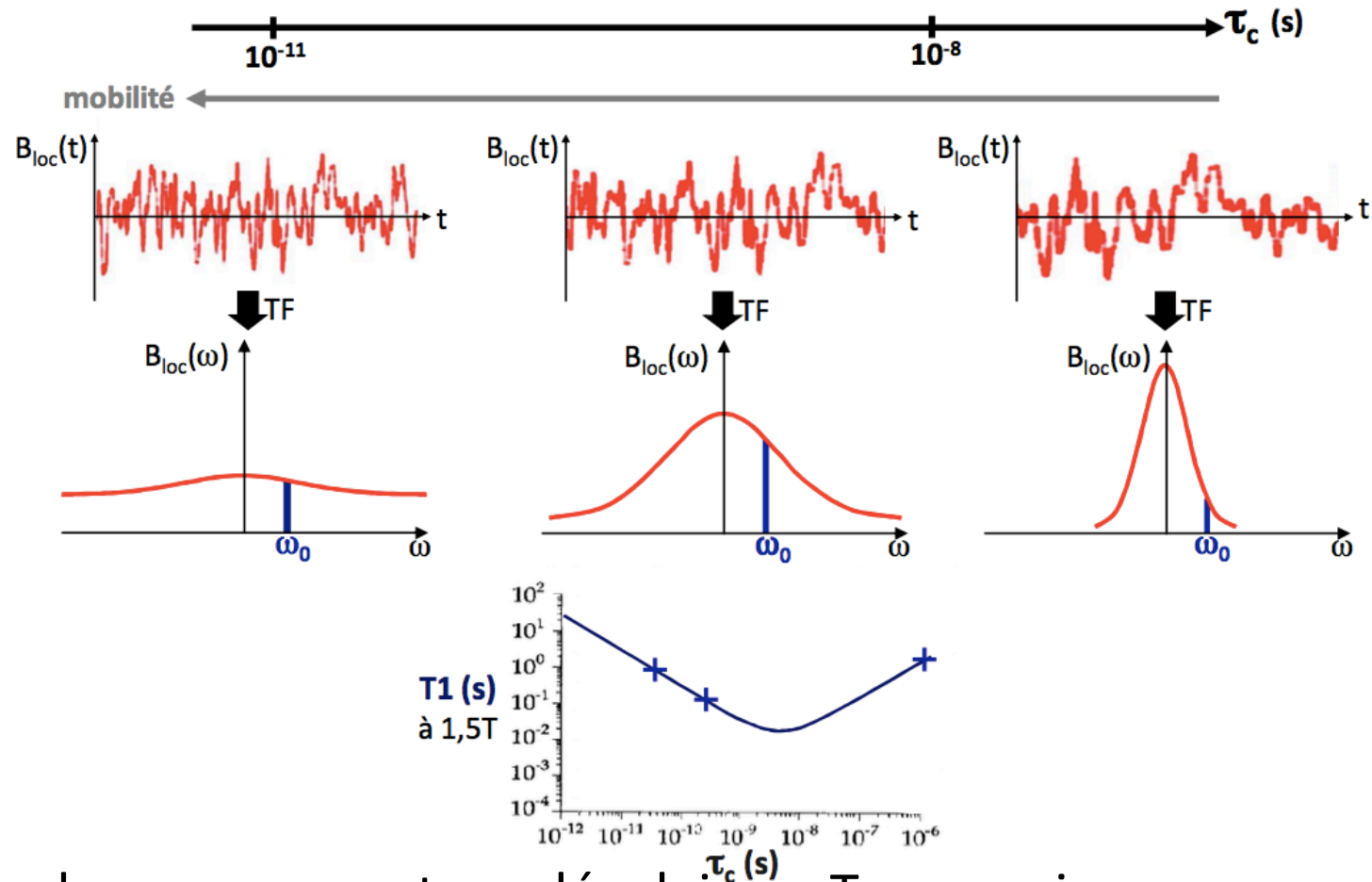
Ces échanges énergétiques ne sont possibles que si B_{local} **fluctue à la pulsation de Larmor ω_0 (γB_0)**.



T_1 dépend de la **probabilité de transition énergétique à ω_0** , i.e de $B_{\text{local}}(\omega_0)$, densité de B_{local} à la pulsation ω_0 .

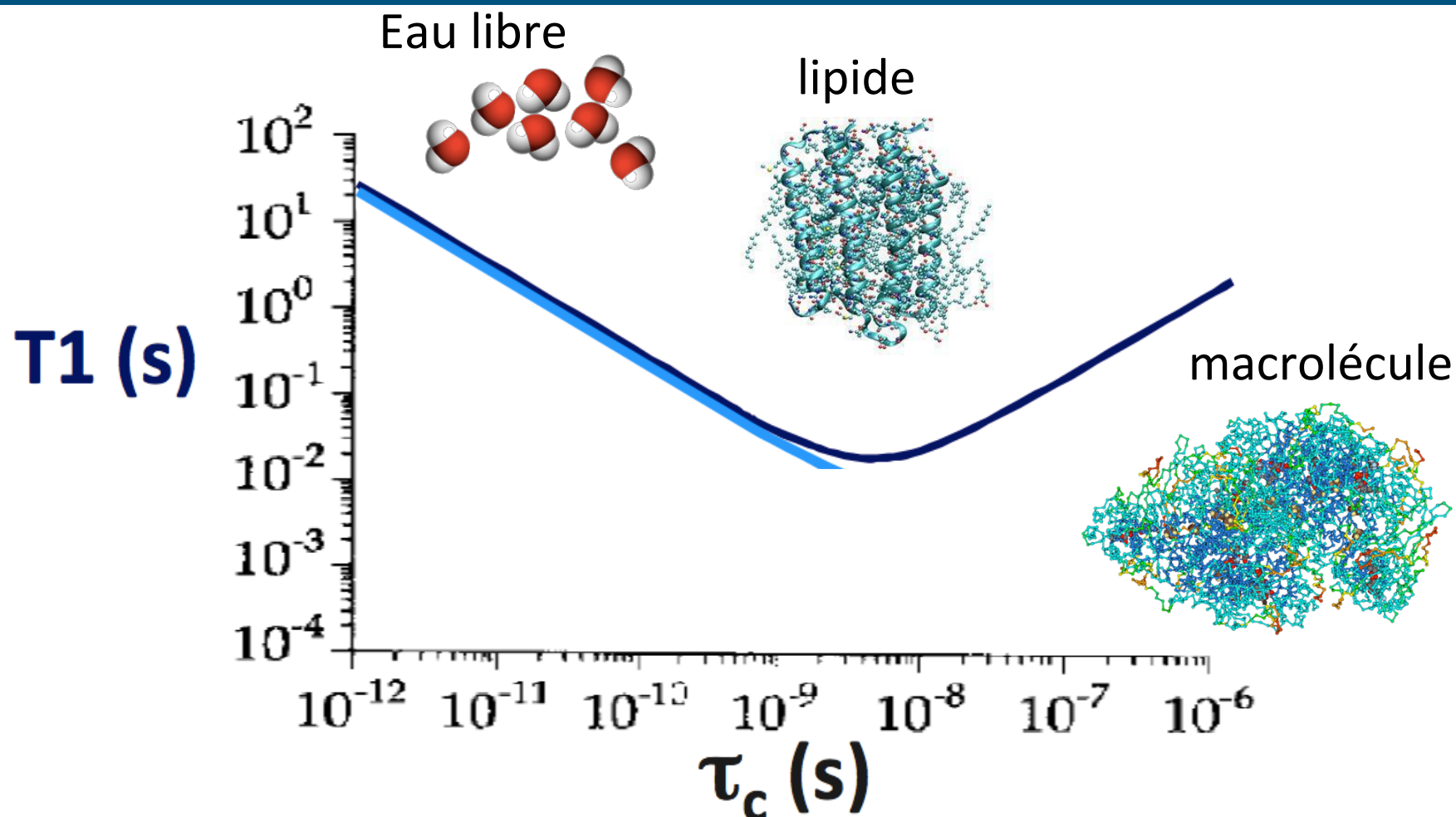
Plus $B_{\text{local}}(\omega_0)$ est élevée, plus T_1 est court

T1 et τ_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_{local}

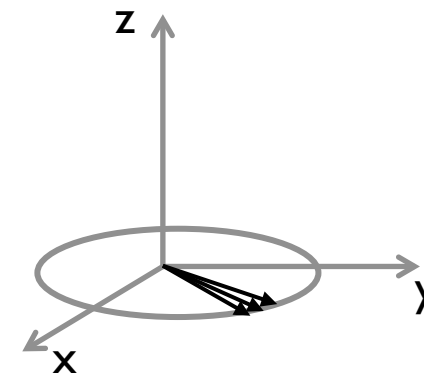
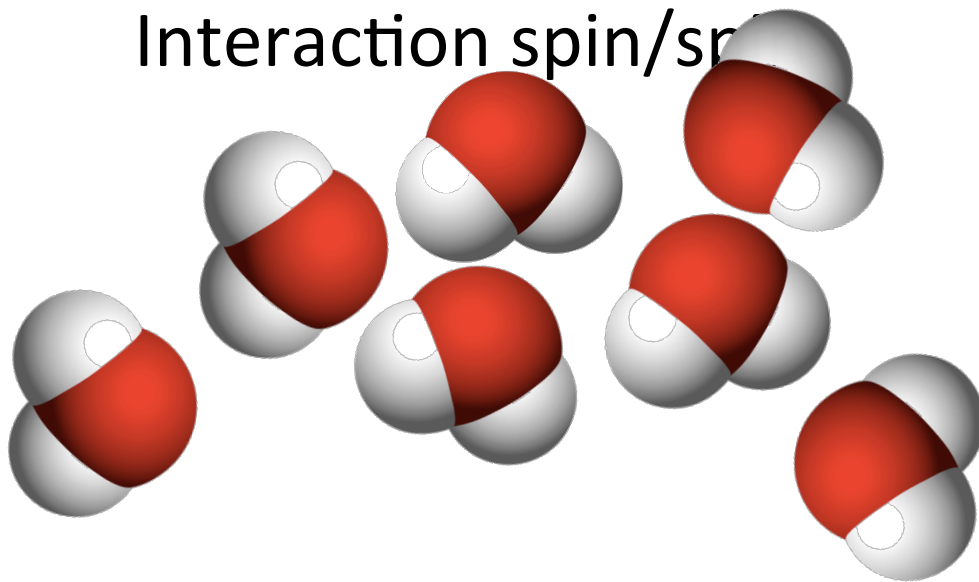
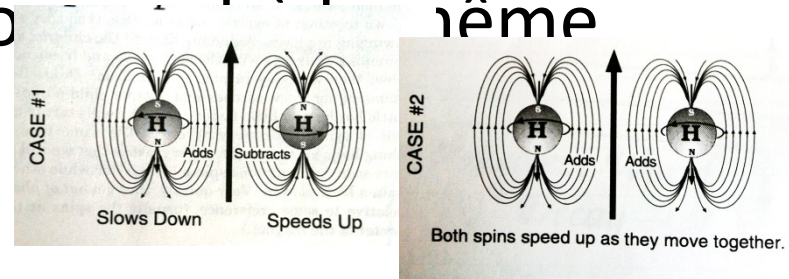
Pour les molécules très mobiles, ces déphasages s'annulent par moyennage :

- Les déphasages apparaissent quand τ_c augmente
- T2 diminue quand τ_c augmente

Mécanisme de relaxation transversale spin-spin

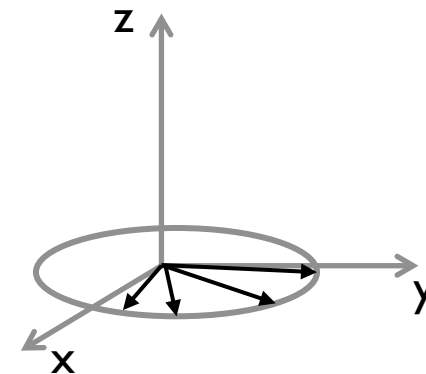
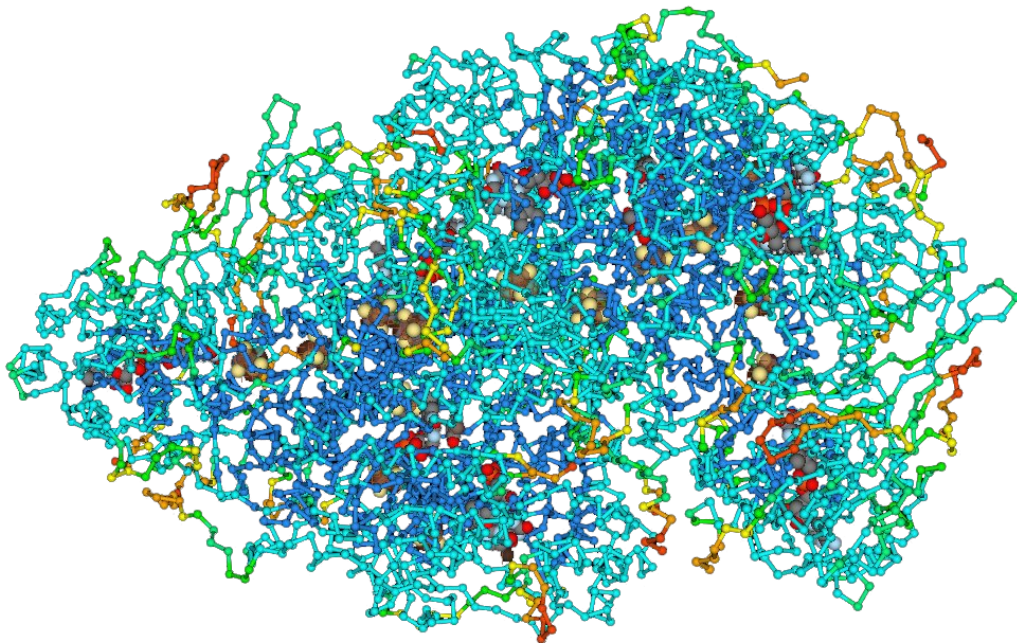
Tous les ^1H voient le même environnement moyen tous les vecteurs tournent à la même fréquence

Interaction spin/spin

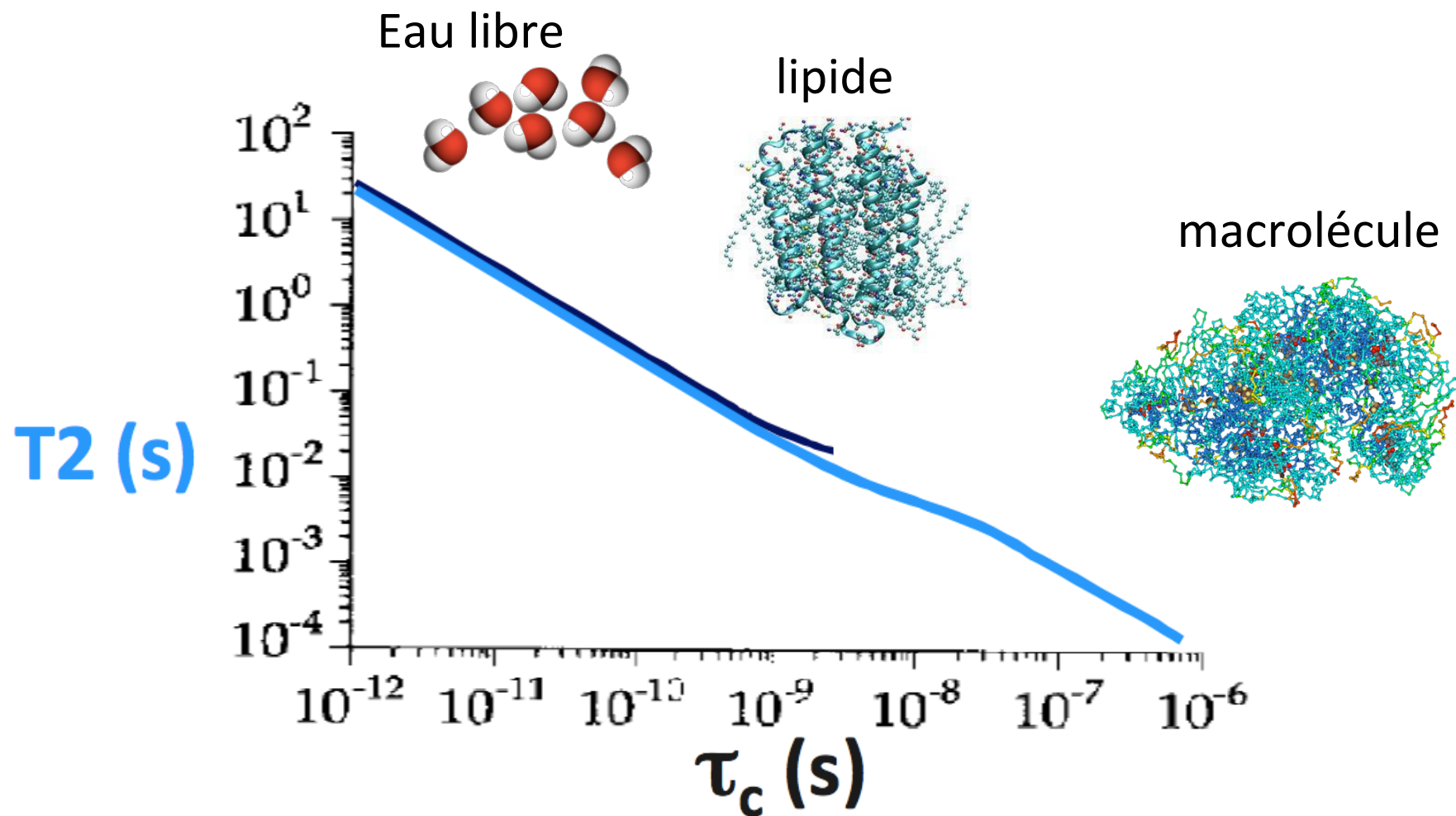


Mécanisme de relaxation transversale spin-spin

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

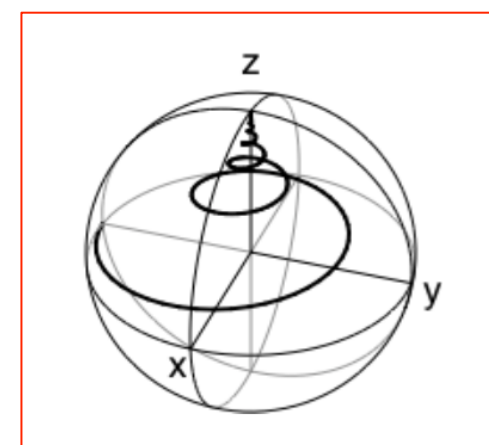
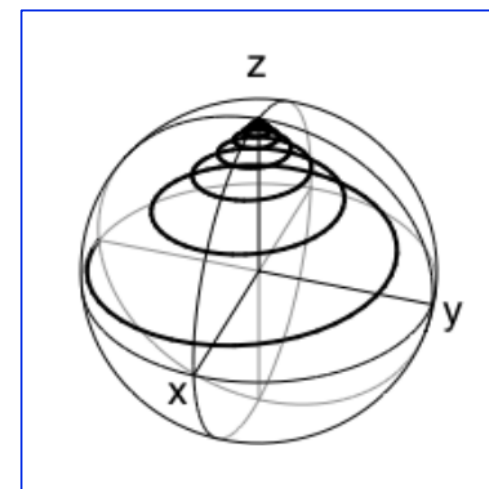


Relaxation T2 @ 1.5T

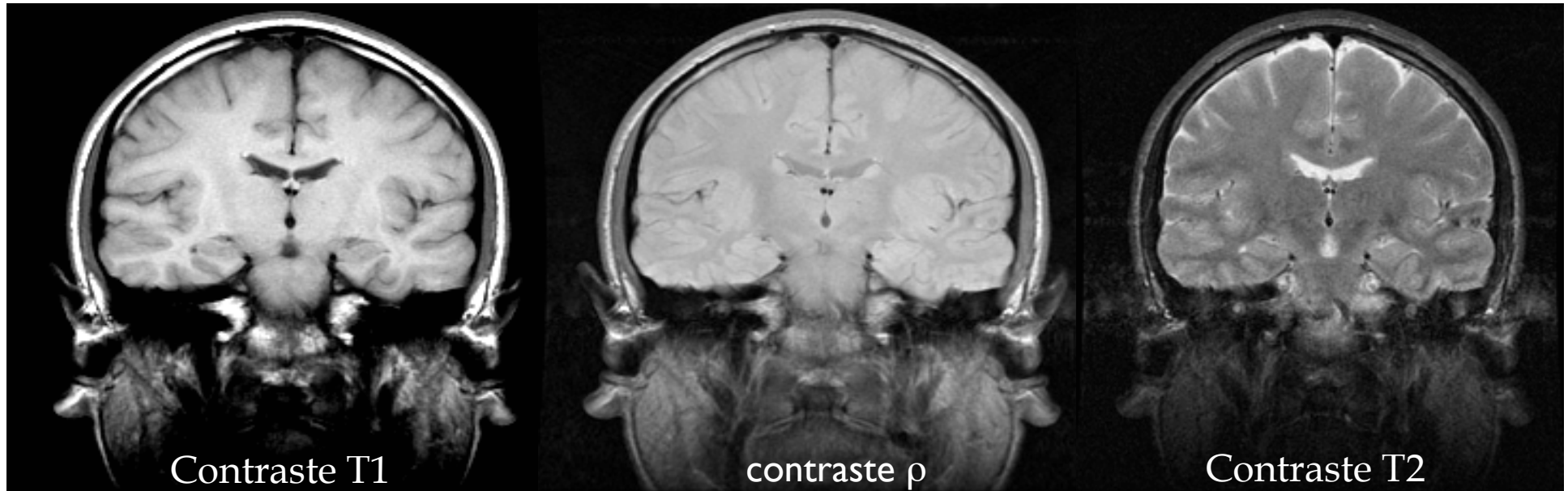


Relaxation T1 et T2 à 1,5 T

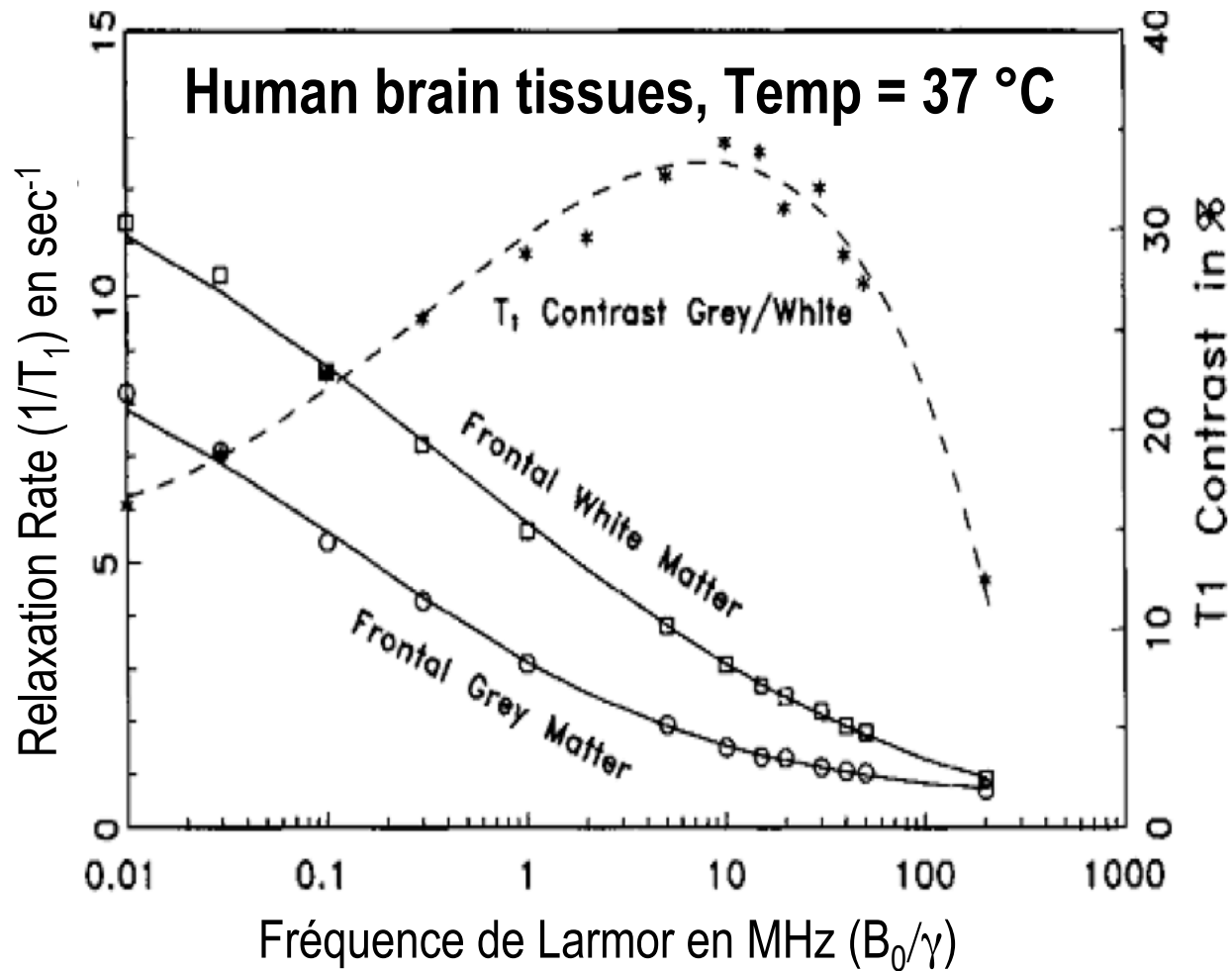
Temps de Relaxation Tissus Humains	T1	T2
Liquide Céphalo-rachidien	2500 ms	2000 ms
Substance Grise	900 ms	90 ms
Substance Blanche	750 ms	80 ms
Graisse	300 ms	40 ms



Relaxation T1 et T2 à 1,5 T

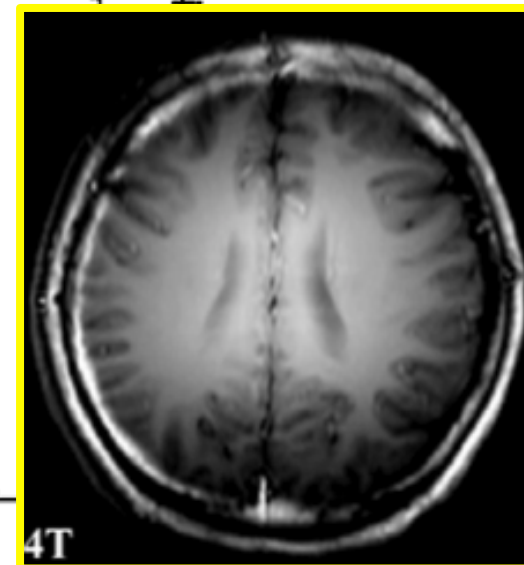
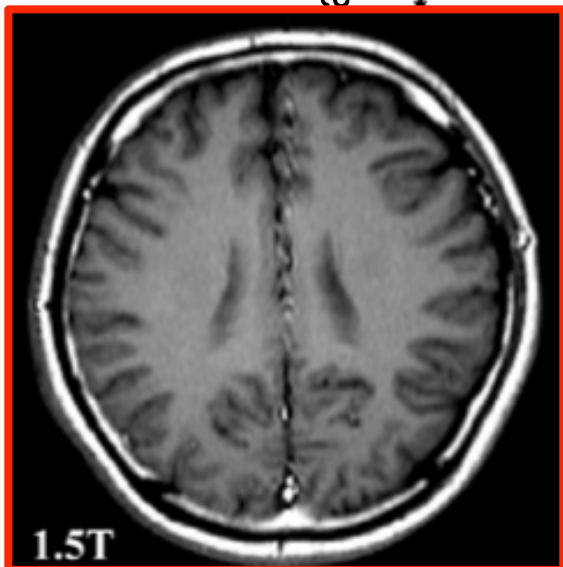
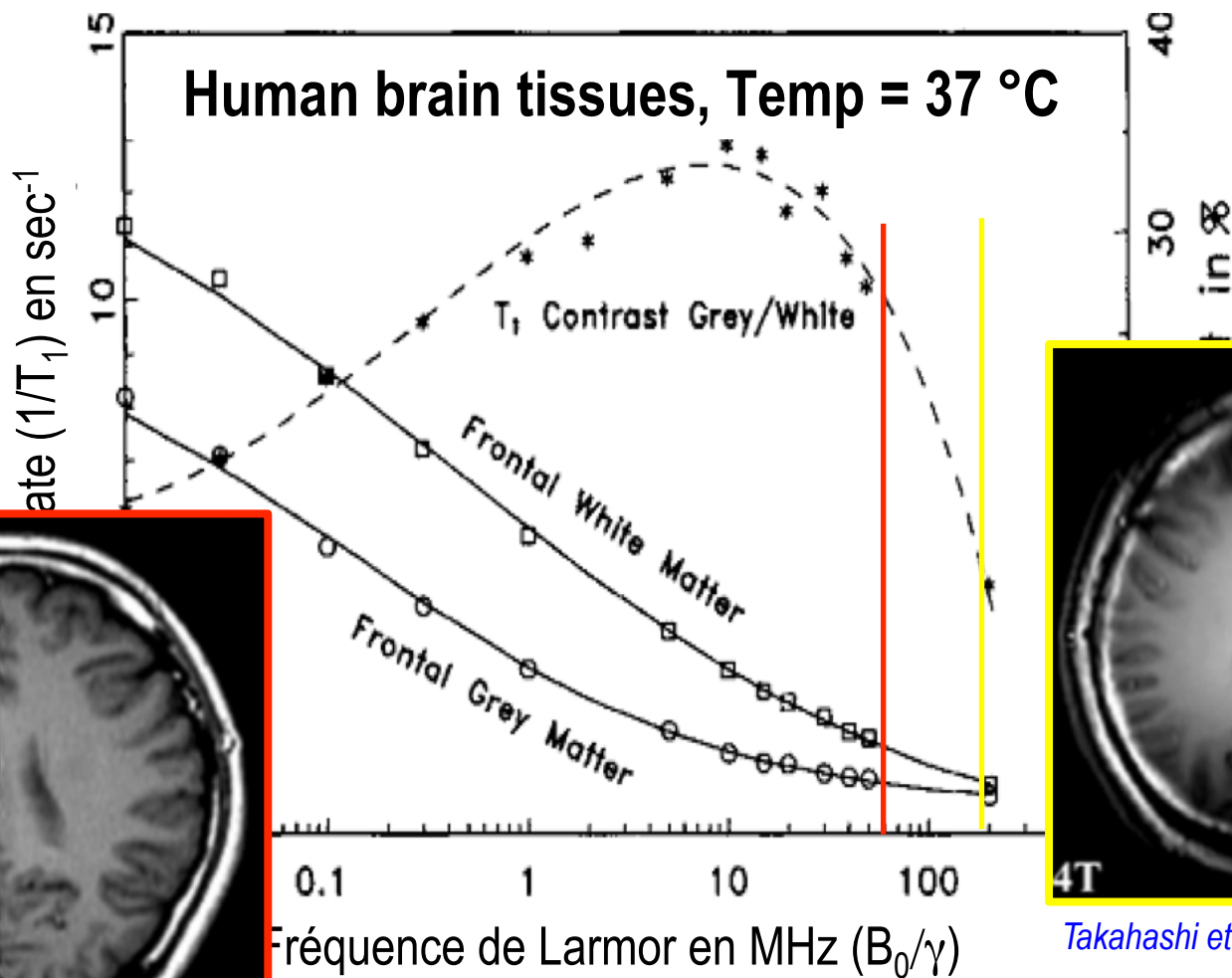


Relaxation – intensité du champ B_0



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

Relaxation – intensité du champ B_0

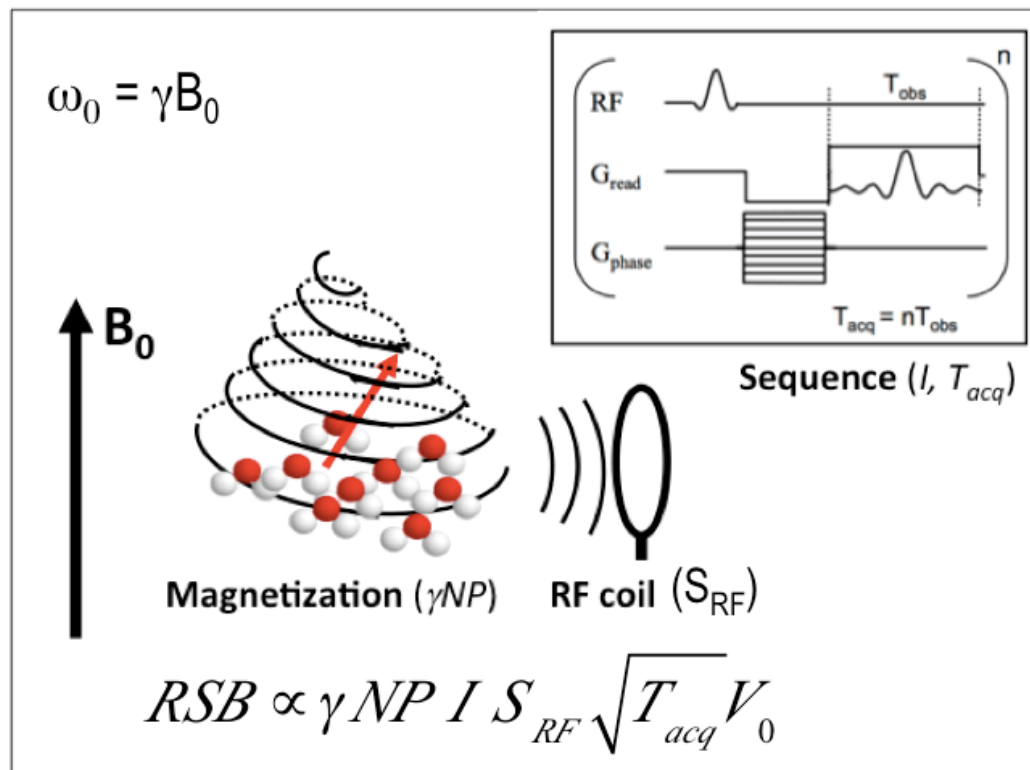


Takahashi et al, E. J. of Radiol 2002

Fischer et al, MRM 1990

Cole et Cole, J. Chem. Phys. 1941

Résumé Mécanisme de relaxation



Relaxation longitudinale (T_1)

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

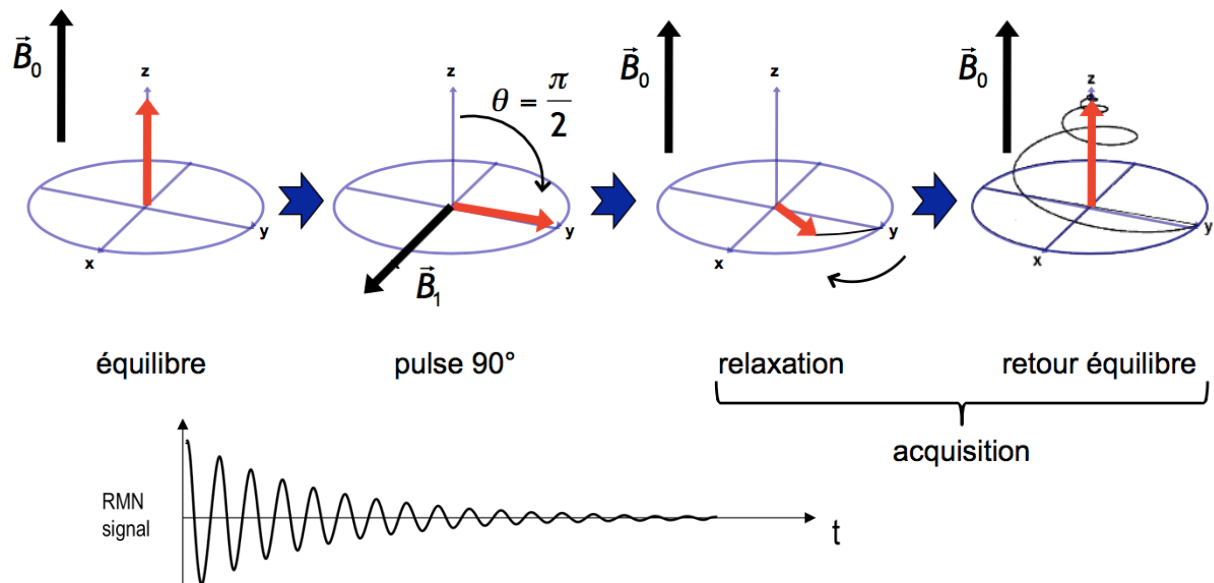
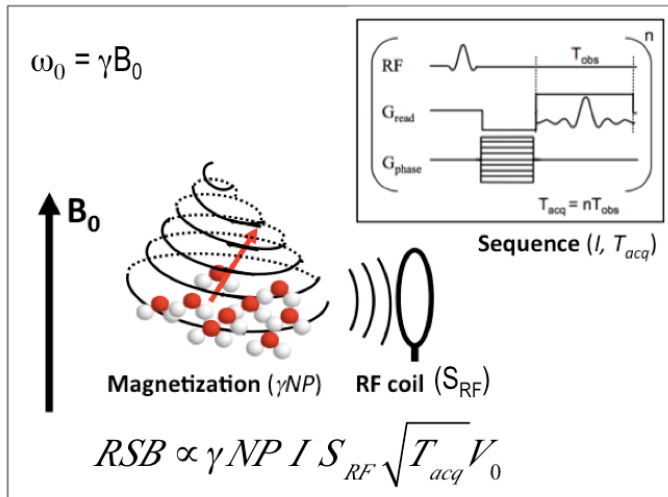
fluctuations du champs proche de la fréquence de Larmor

Relaxation transversale (T_2)

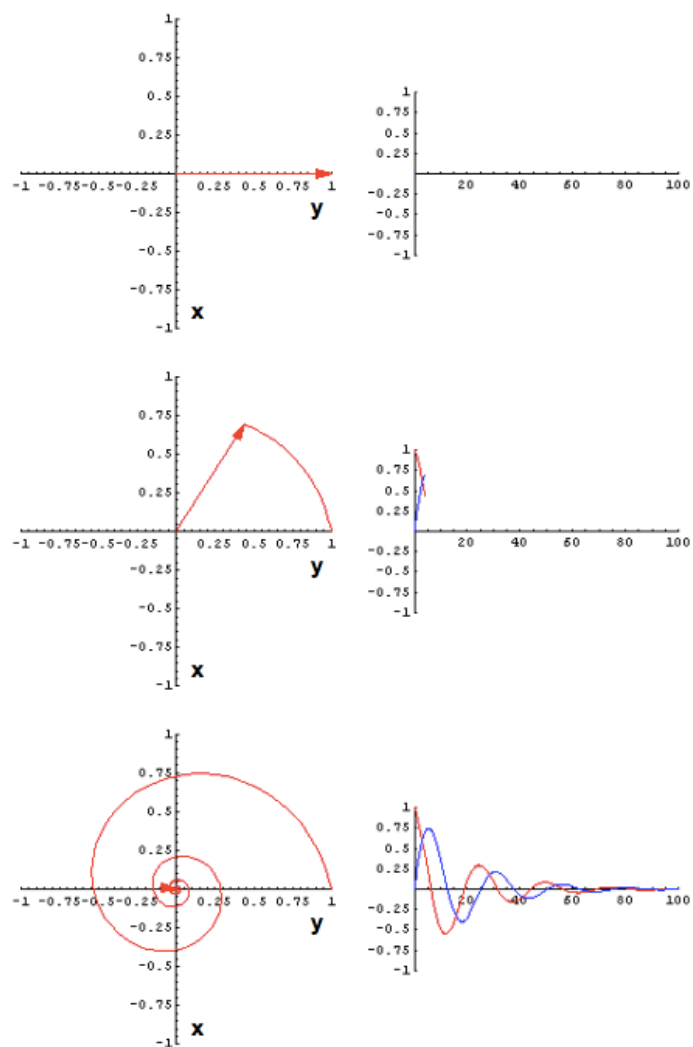
$$M_{xy} = M_0 \sin(\alpha) \exp(-t/T_2) \sin(\omega_0 t)$$

distorsion du champ magnétique

Résonance Magnétique Nucléaire en résumé

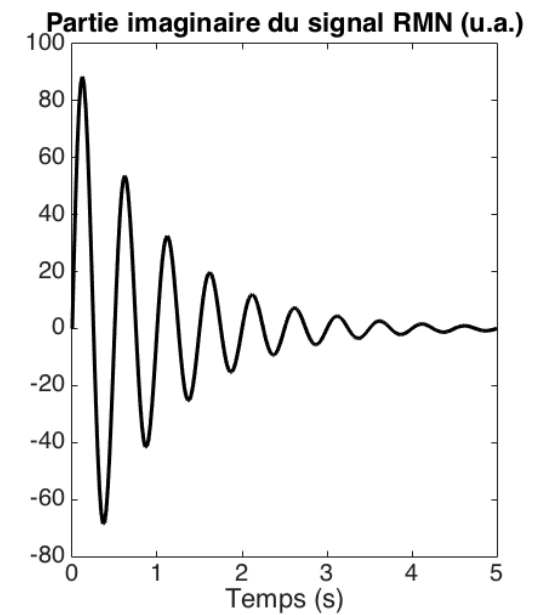
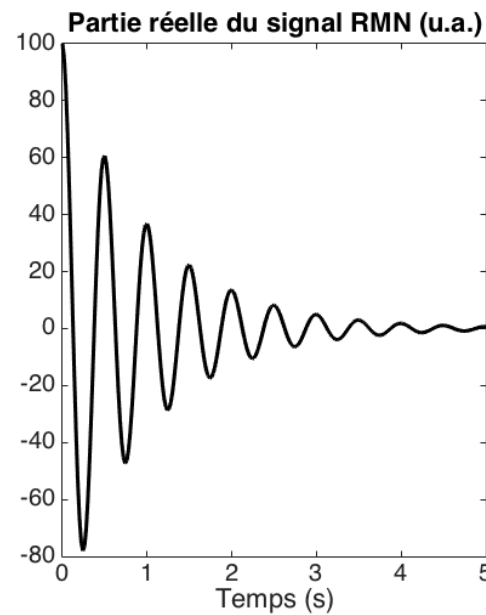
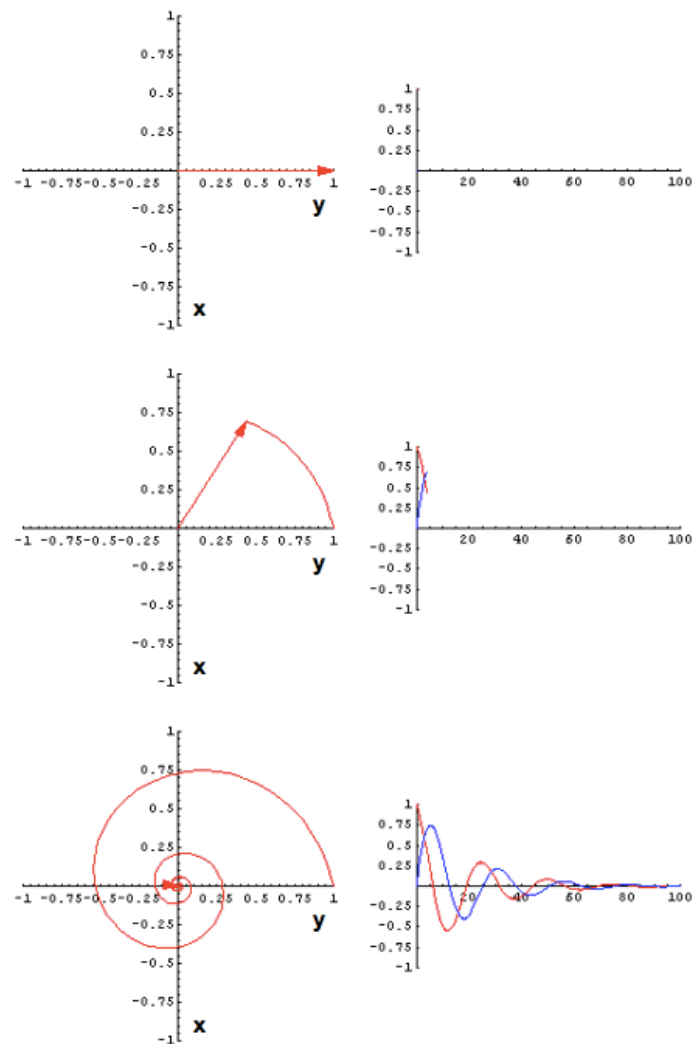


Signal RMN



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

Signal RMN



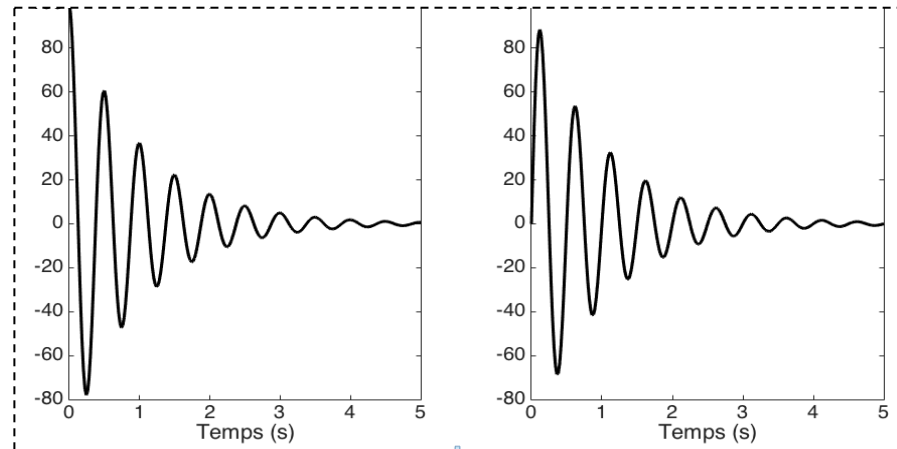
Le signal RMN est appelé FID (Free Induction Decay).

Transformée de Fourier

Partie réelle

Partie imaginaire

signal RMN (u.a.)



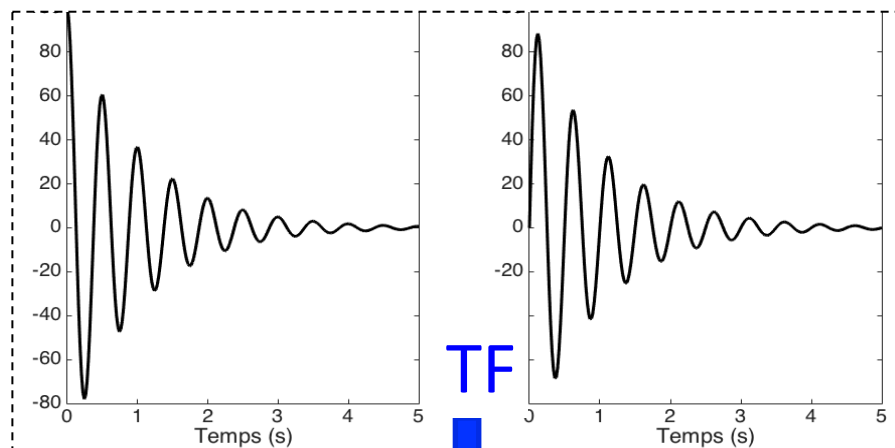
Transformée de Fourier



Partie réelle

Partie imaginaire

signal RMN (u.a.)



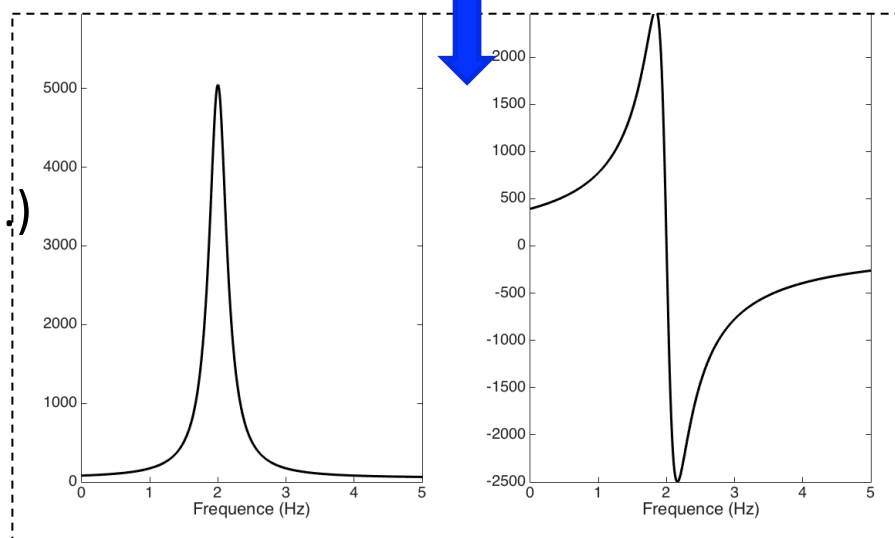
$$f(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{i\omega t} dt$$

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

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

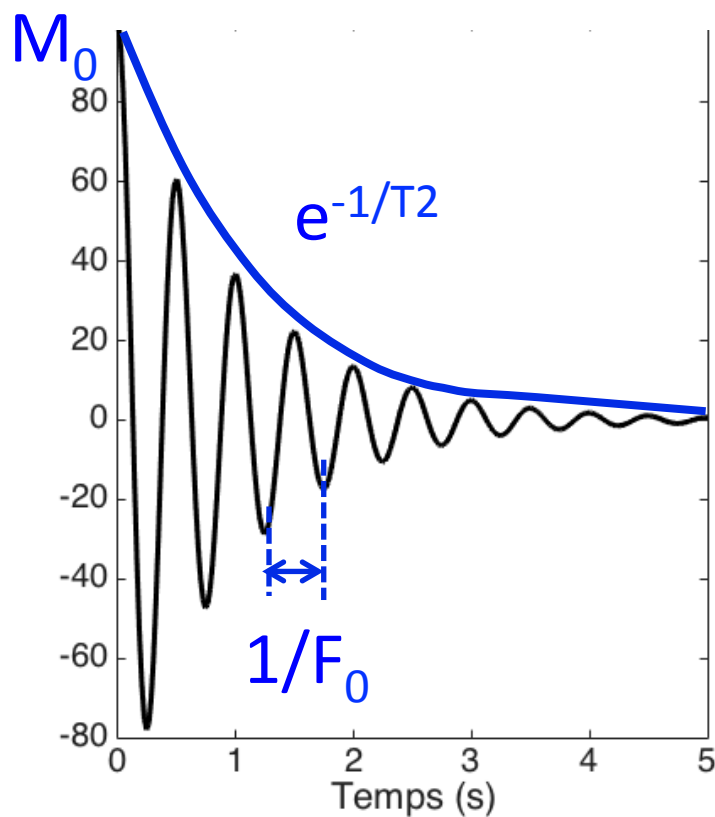
$$\text{Im}[f(\omega)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \sin \omega t dt$$

TF(signal RMN) (u.a.)

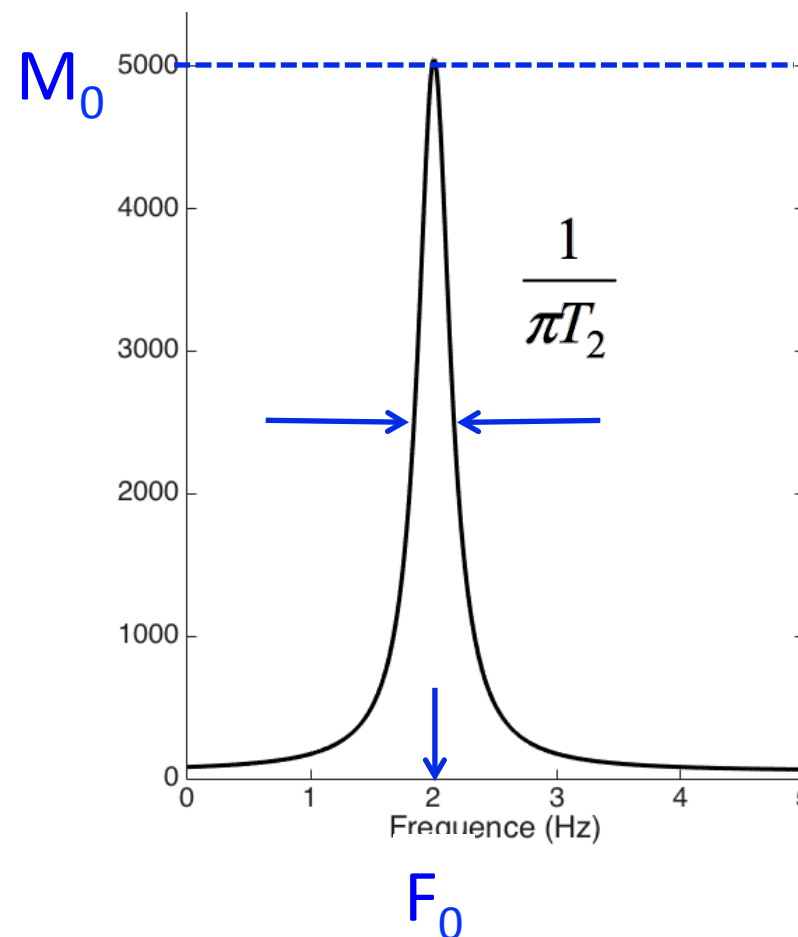


Transformée de Fourier

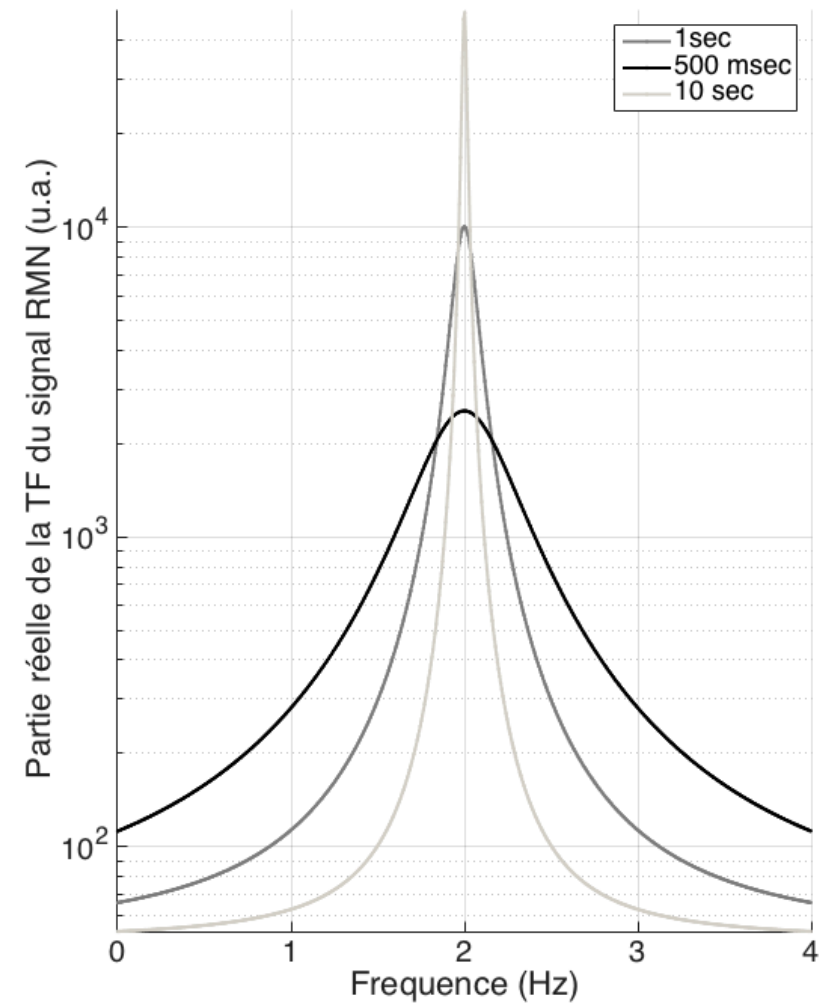
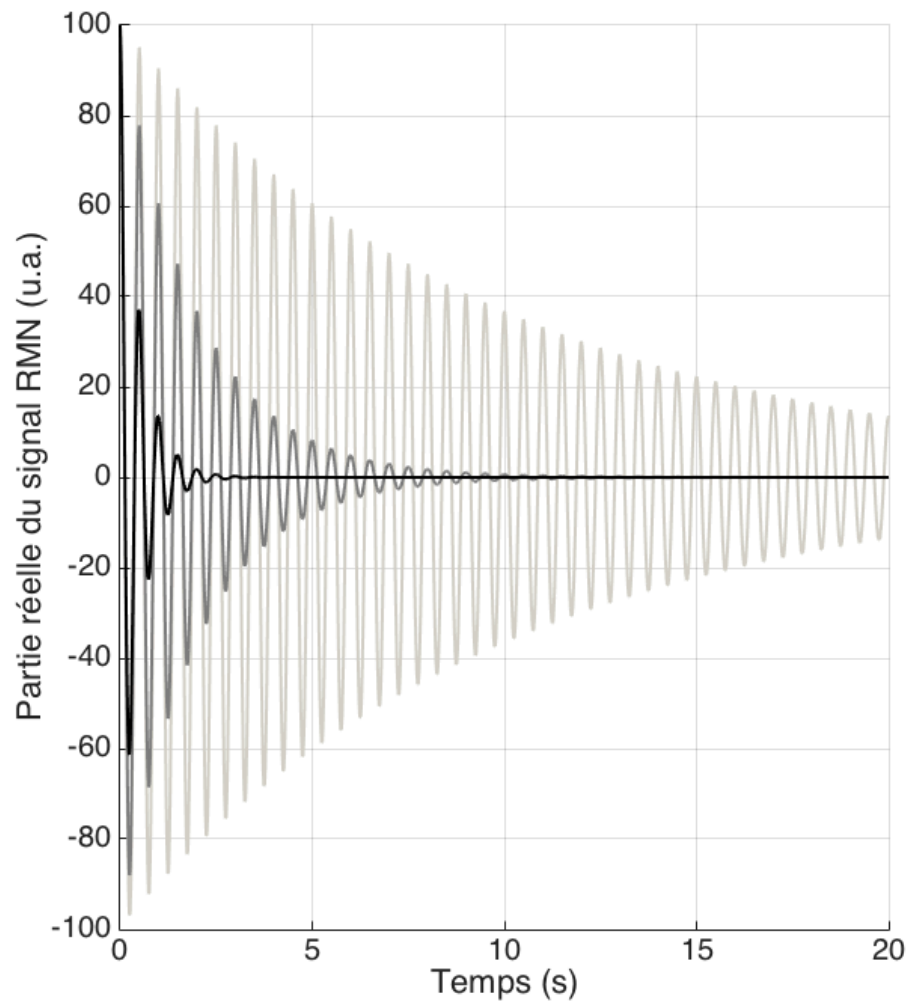
signal RMN (u.a.)



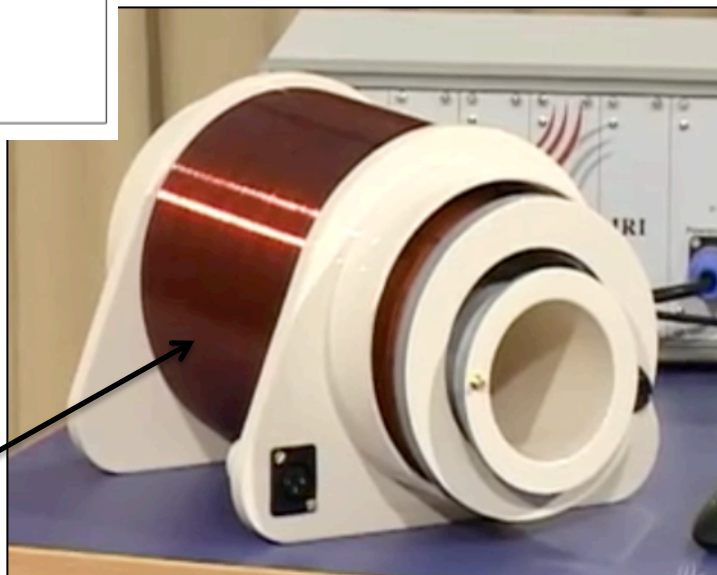
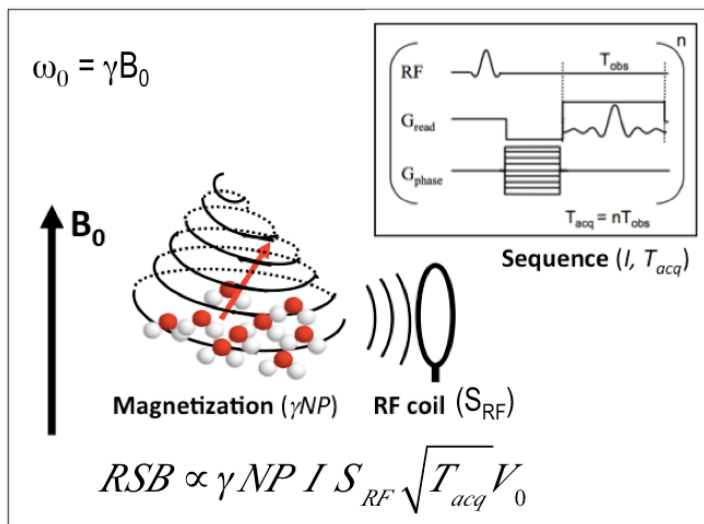
TF(signal RMN) (u.a.)



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



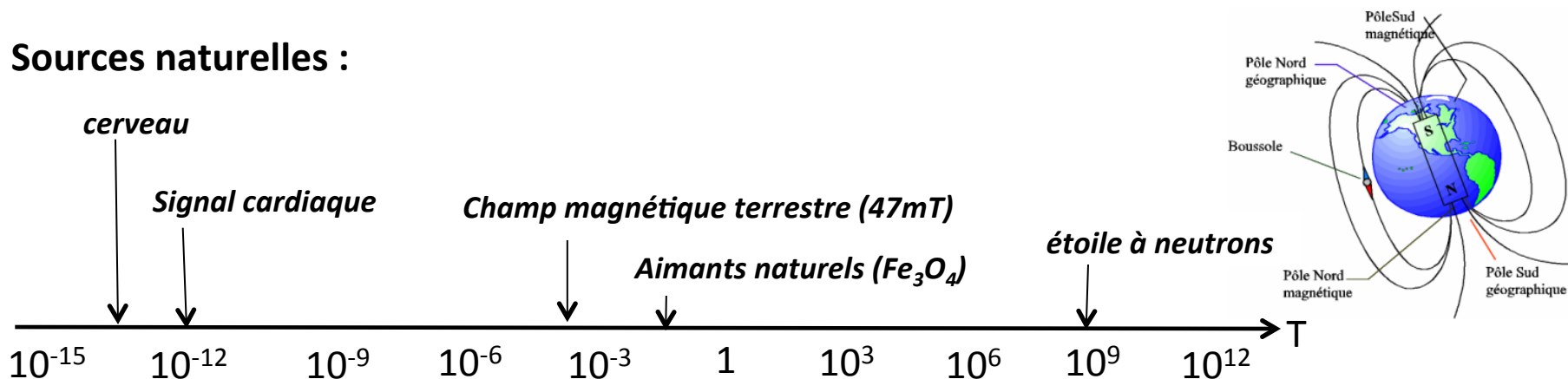
Instrumentation en l'IRM



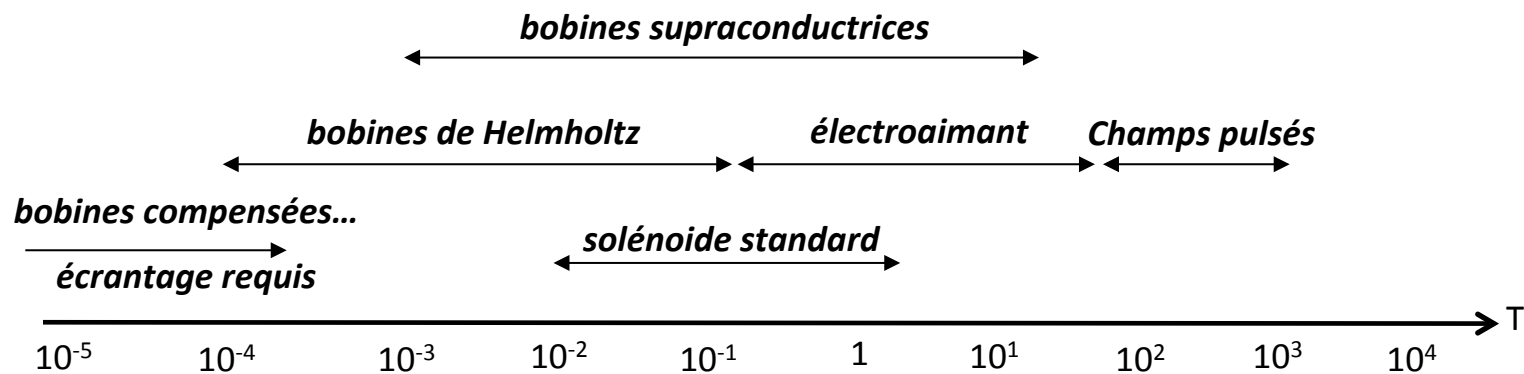
**Champ magnétique
statique B_0 (Tesla)**
Precession des spins
nucléaire à
 $\omega_0 = \gamma B_0$
Pulsation de Larmor

Champ magnétique statique

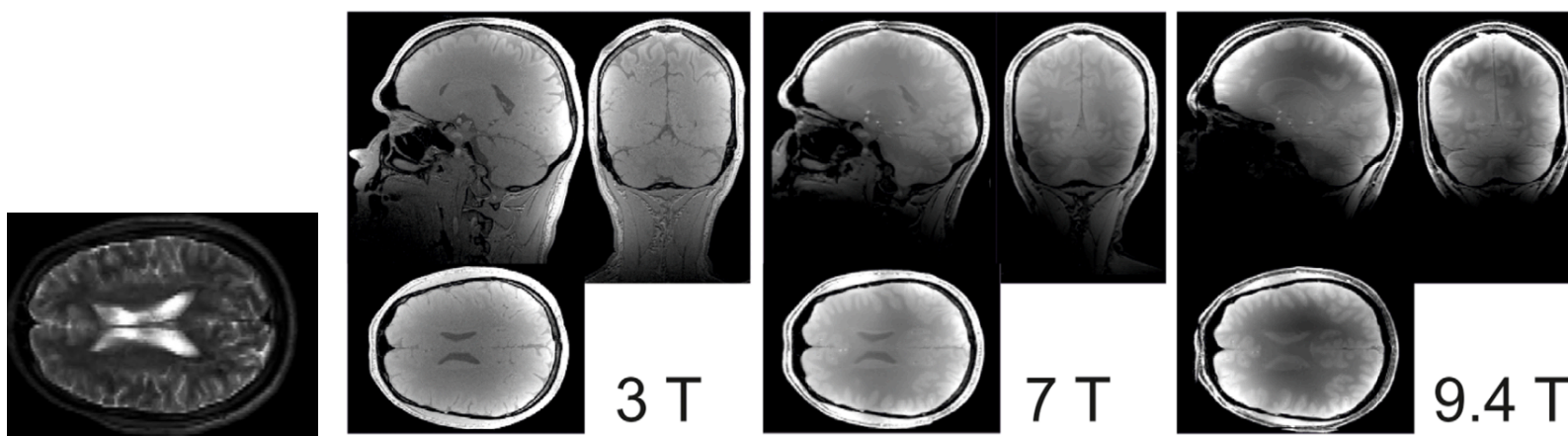
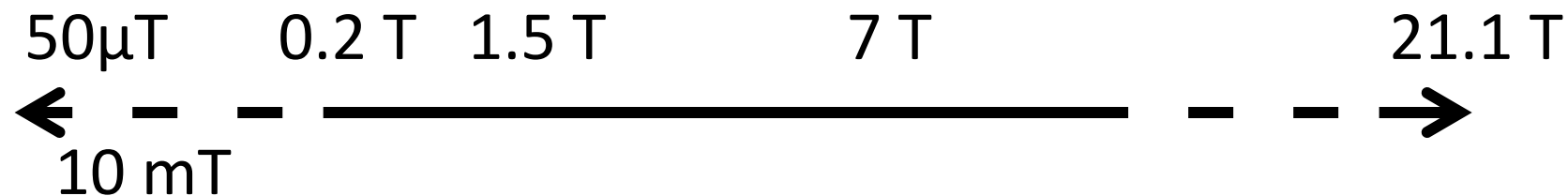
Sources naturelles :



Génération des champ magnétiques :



Champ magnétique statique



Sarracanie et al. 2015

Pohmann et al. 2016

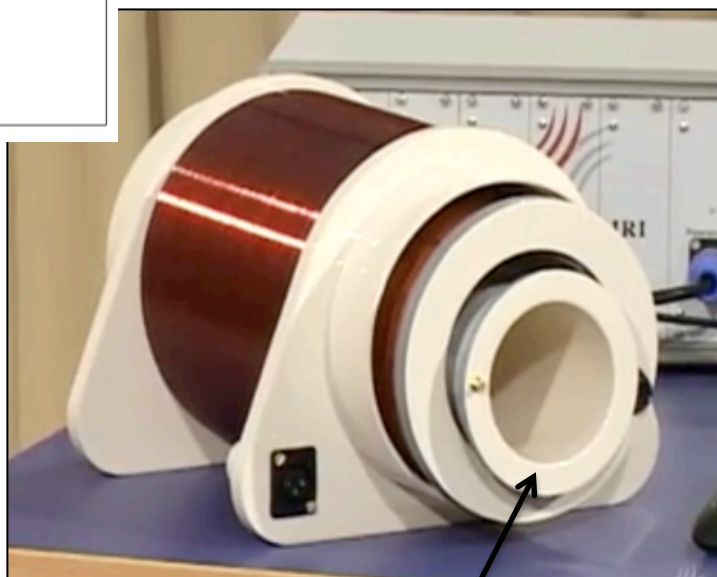
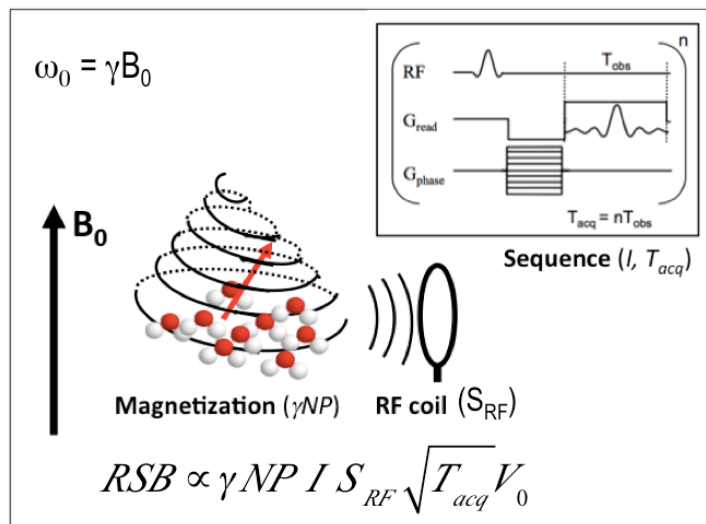
Objets compatibles ou non avec une IRM



Objets compatibles ou non avec une IRM



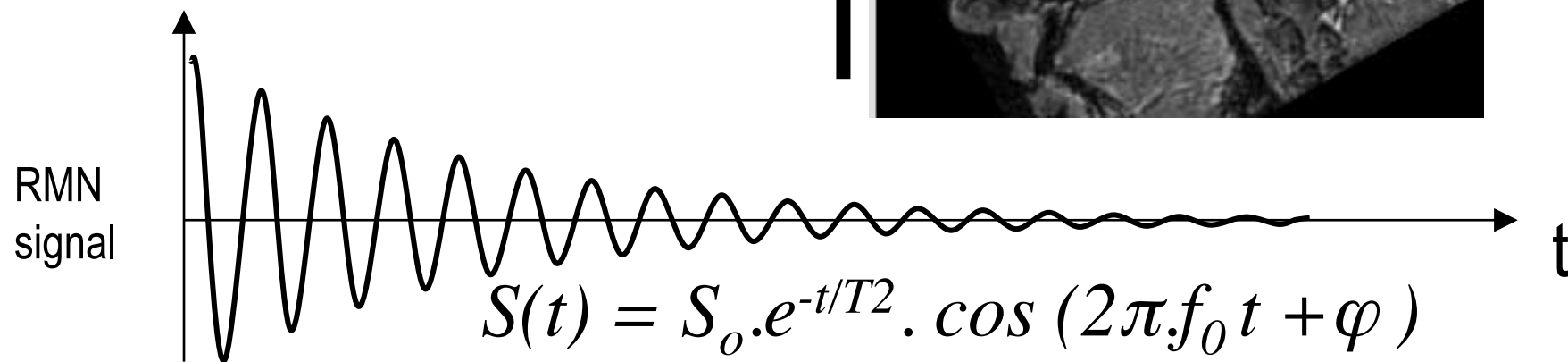
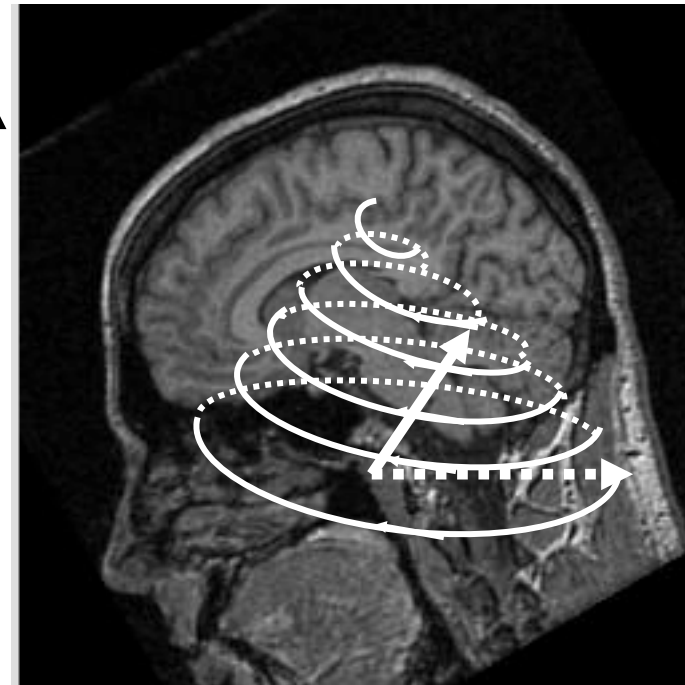
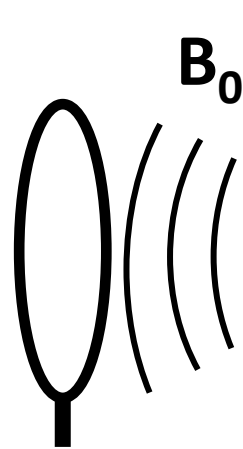
Instrumentation en l'IRM



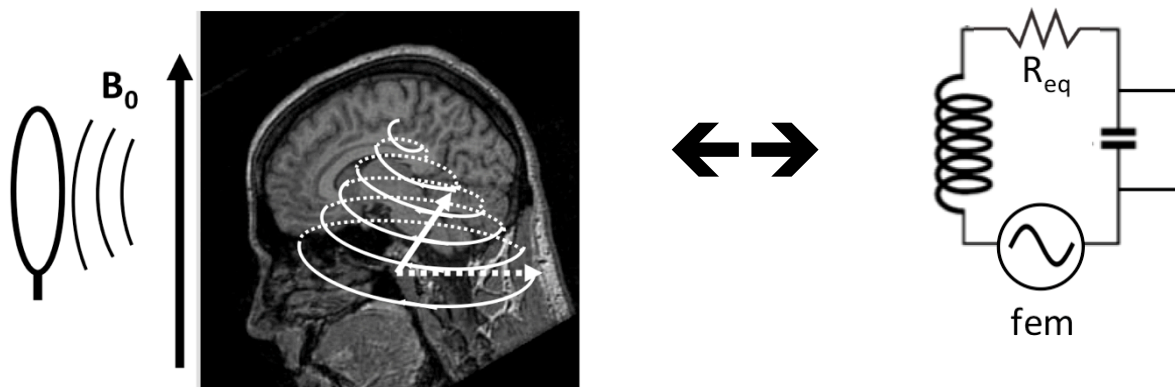
Antenne RF

Précession libre et relaxation

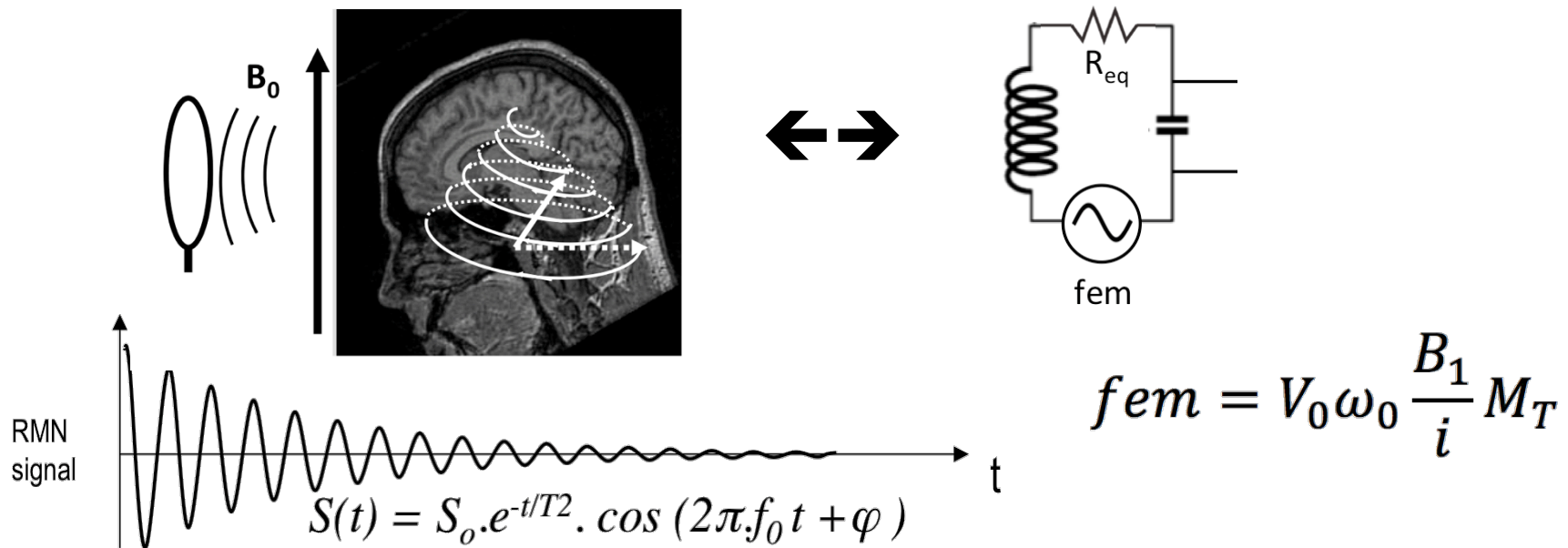
$$\omega_0 = \gamma B_0$$



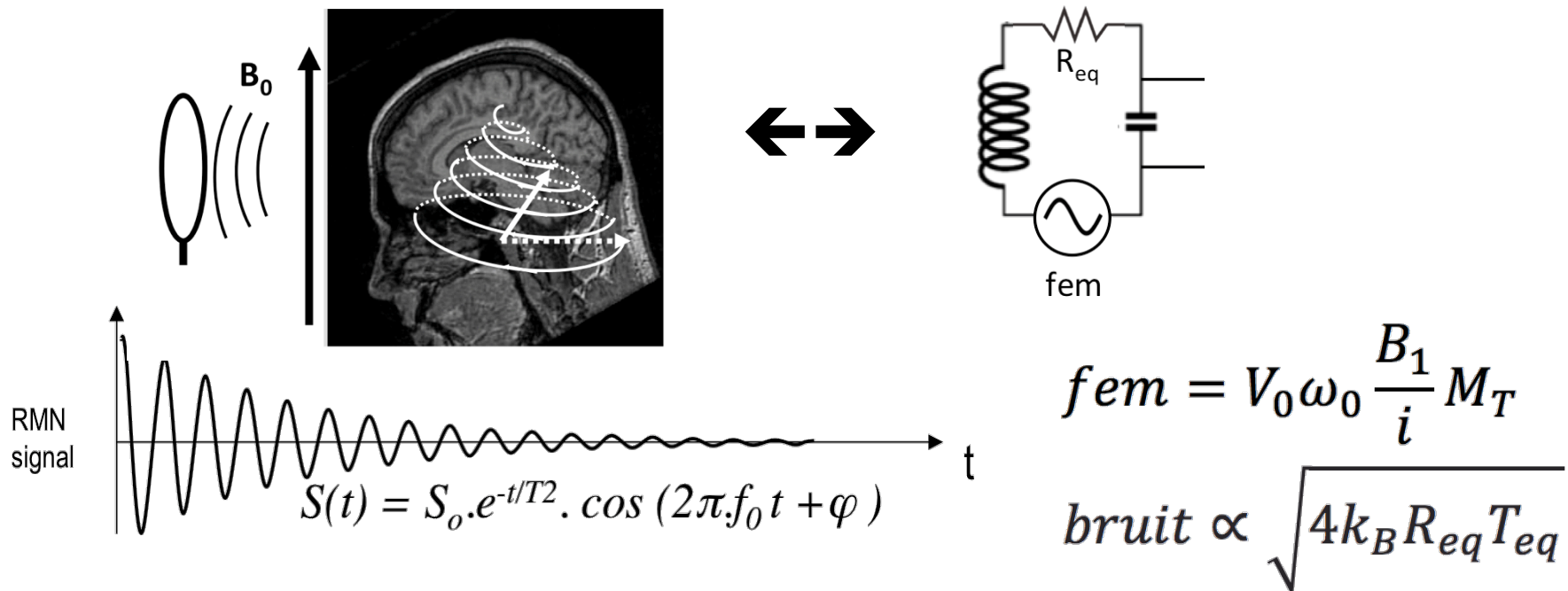
Sensibilité du détecteur



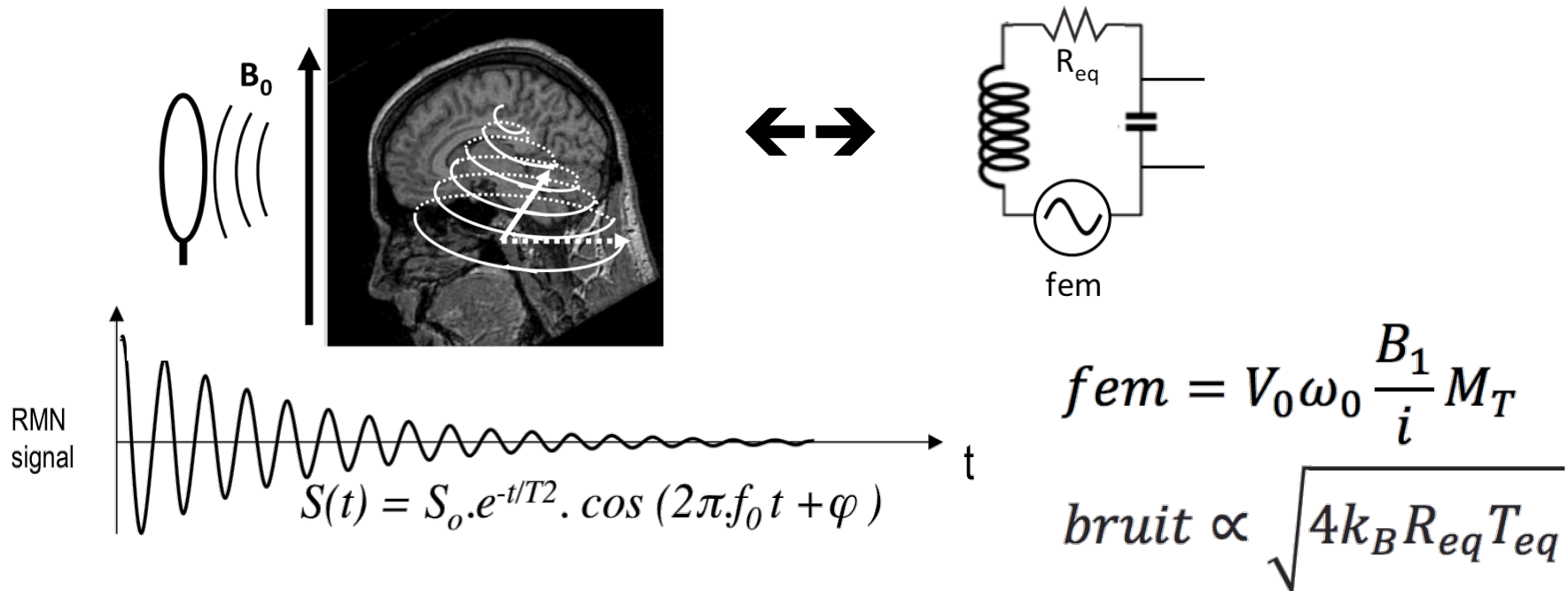
Sensibilité du détecteur



Sensibilité du détecteur



Sensibilité du détecteur

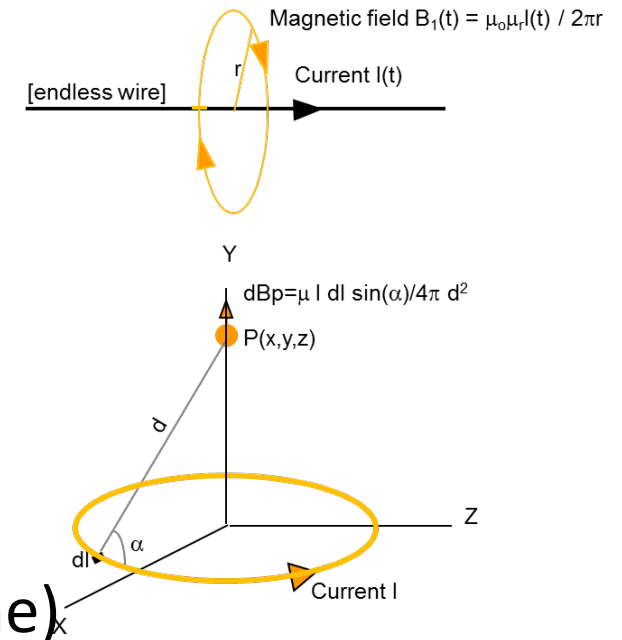


Sensibilité Radio Fréquence

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

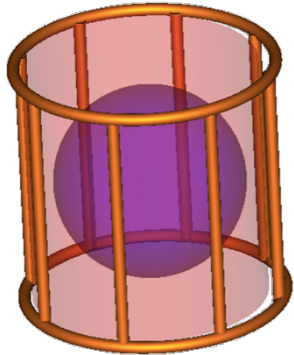
Champ B_1 RF - Equations

- 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

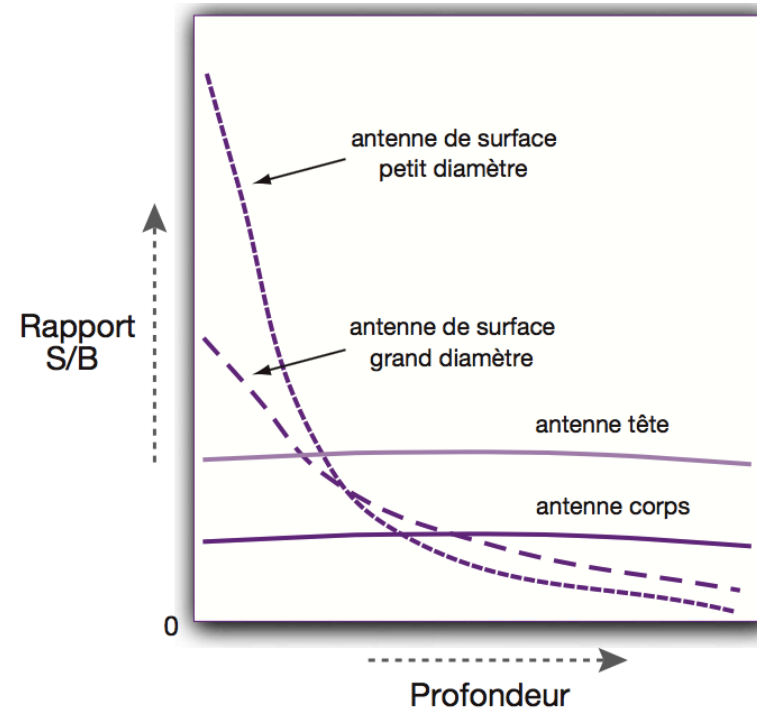


Antennes de volume et de surface

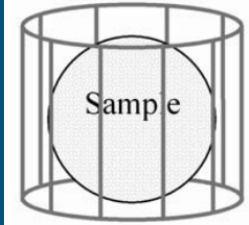
Antenne de volume



- Réponse @uniforme
- SNR limité par l'objet

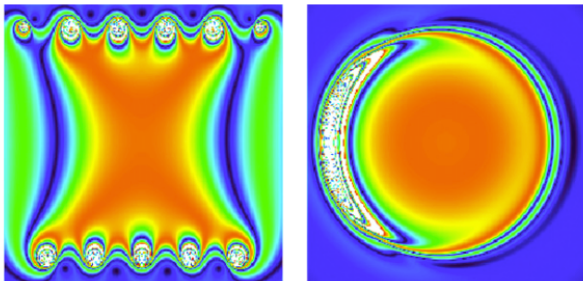
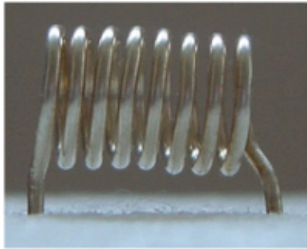


Antennes RF de volume

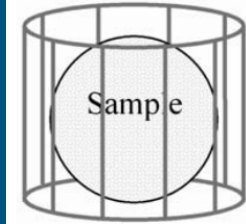


solénoïde

Solénoïde



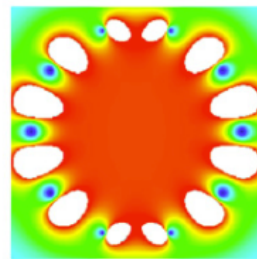
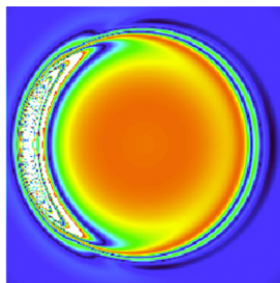
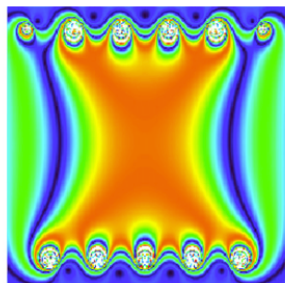
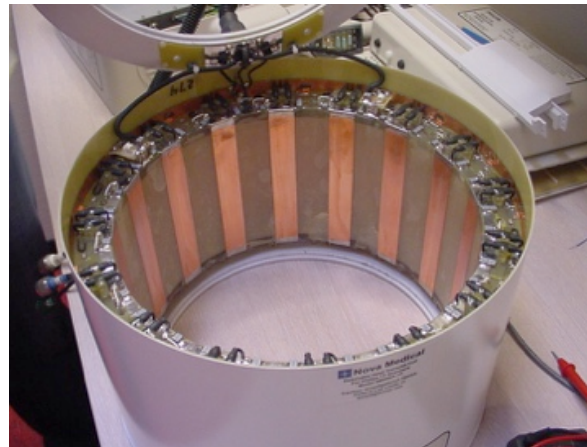
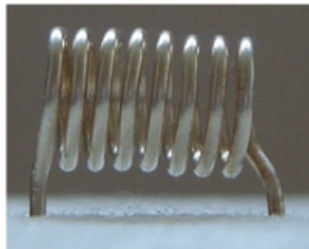
Antennes RF de volume



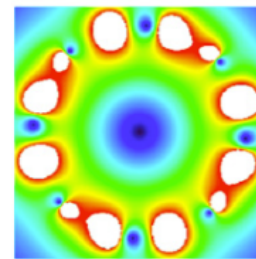
solénoïde

birdcage

Solénoïde

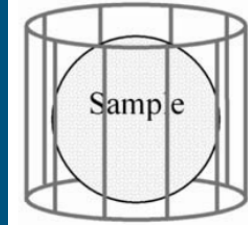


k=1



k=2

Antennes RF de volume

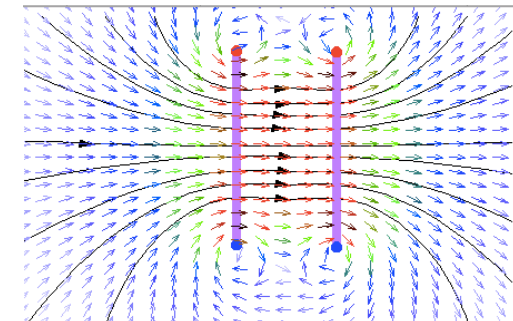
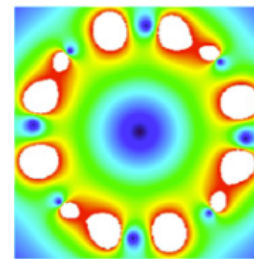
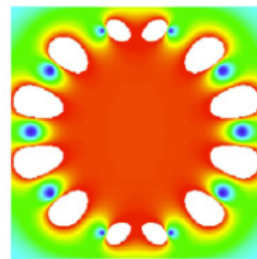
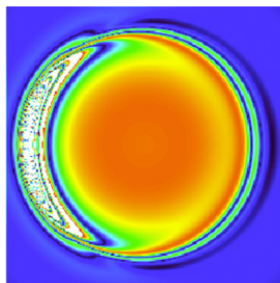
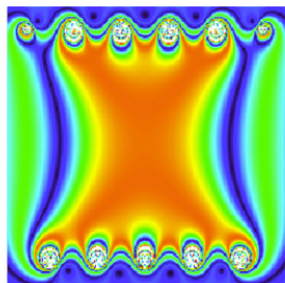
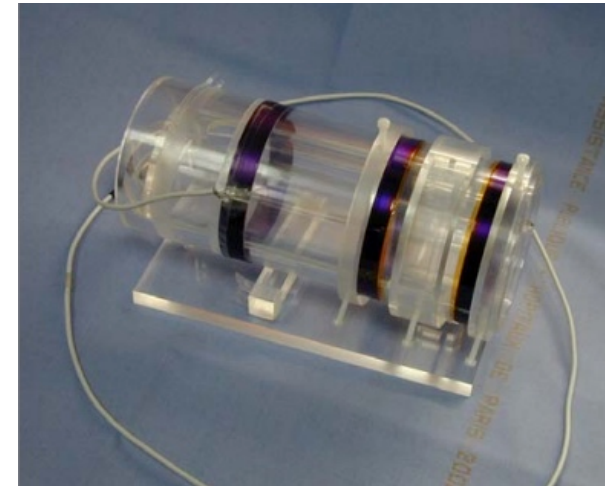
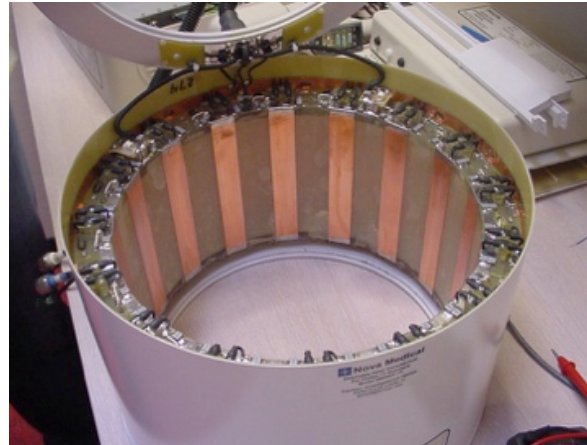
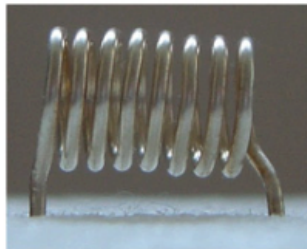


solénoïde

birdcage

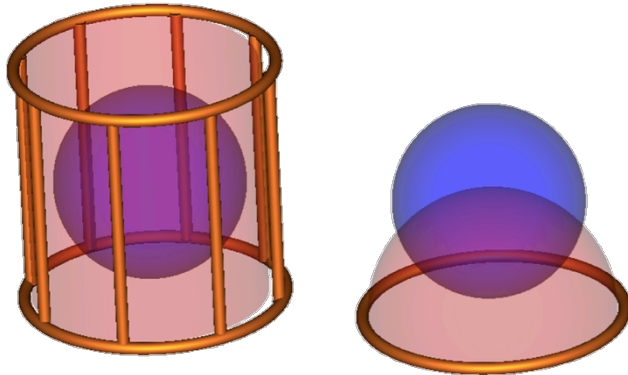
Bobine d'Helmoltz

Solénoïde



Antennes de volume et de surface

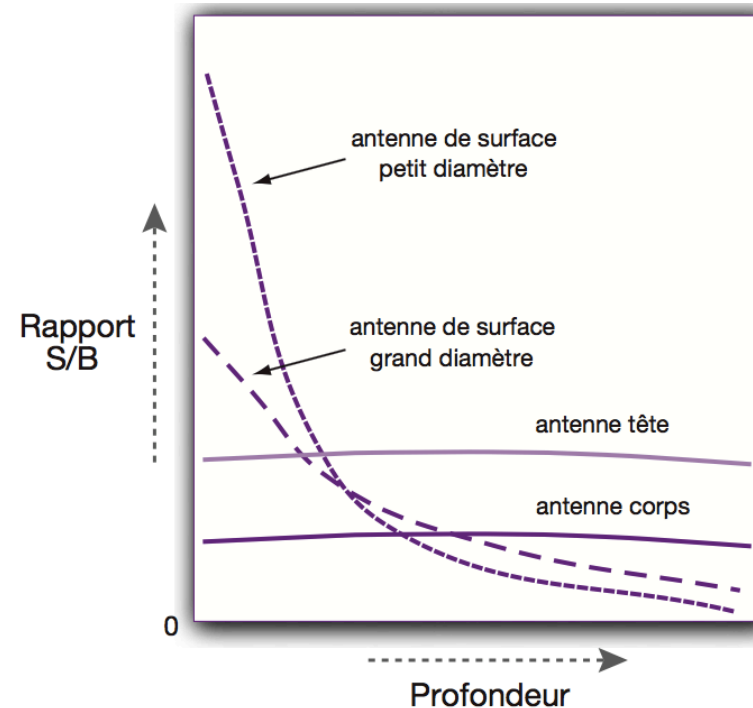
Antenne de volume



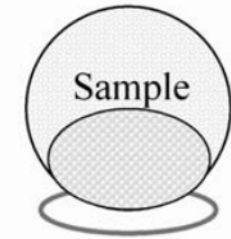
Antenne de surface

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

- Réponse locale
- SNR élevé



Surface (flat) coil

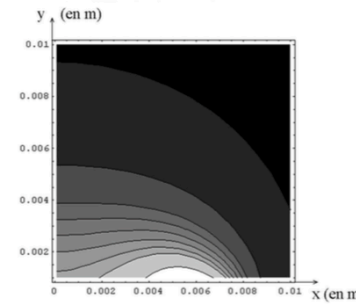


Surface coil

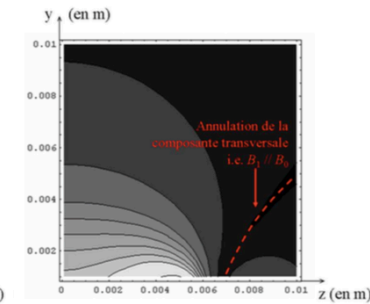


AJR june 2007 vol
188 no 6
1568-1572

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

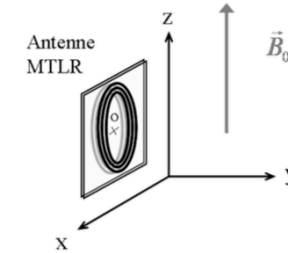
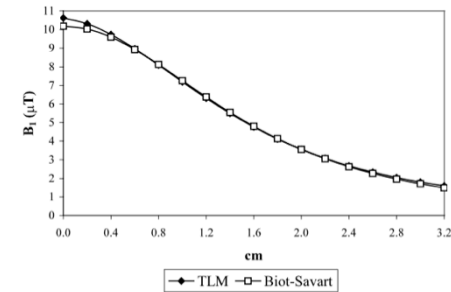


Figure II-8 : Homogénéité du champ RF créé par une antenne MTLR (Ø 12mm, 6 tours, pour ^1H à 1,5 T)

Surface Coil

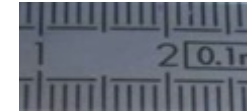


Electromagnetic characterization of MR RF coils using the transmission-line modelling method, Cassidy et al. 2001

Amélioration de la sensibilité

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

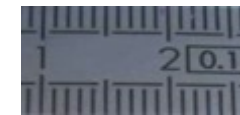
Woytasik, M., et al., 2007



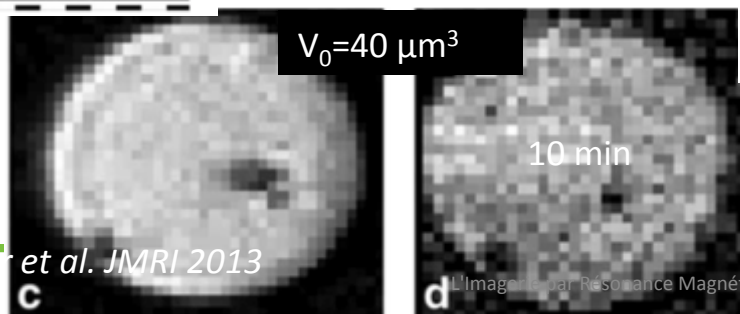
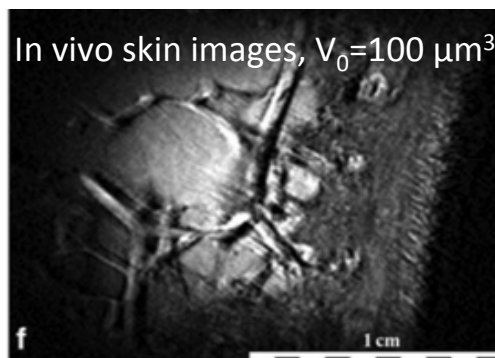
Amélioration de la sensibilité

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

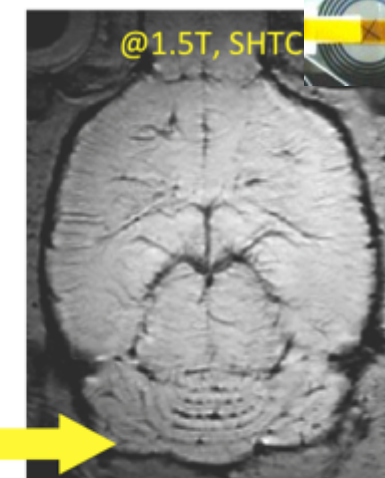
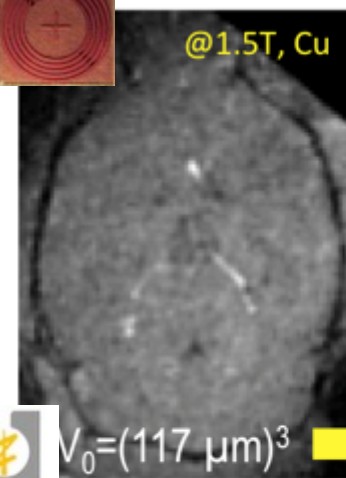
Woytasik, M., et al., 2007



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



et al. JMRI 2013



RSB x 5

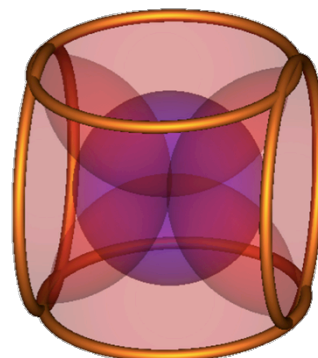
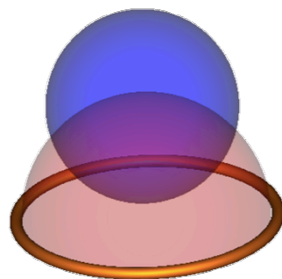
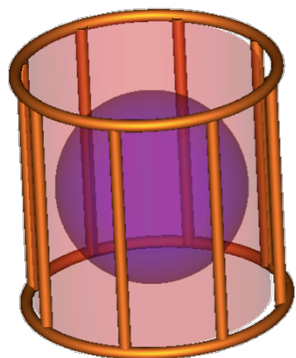
Laistler et al. JMRI 2013

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

Smirnov et al., MRM 2008

Antennes de volume et de surface

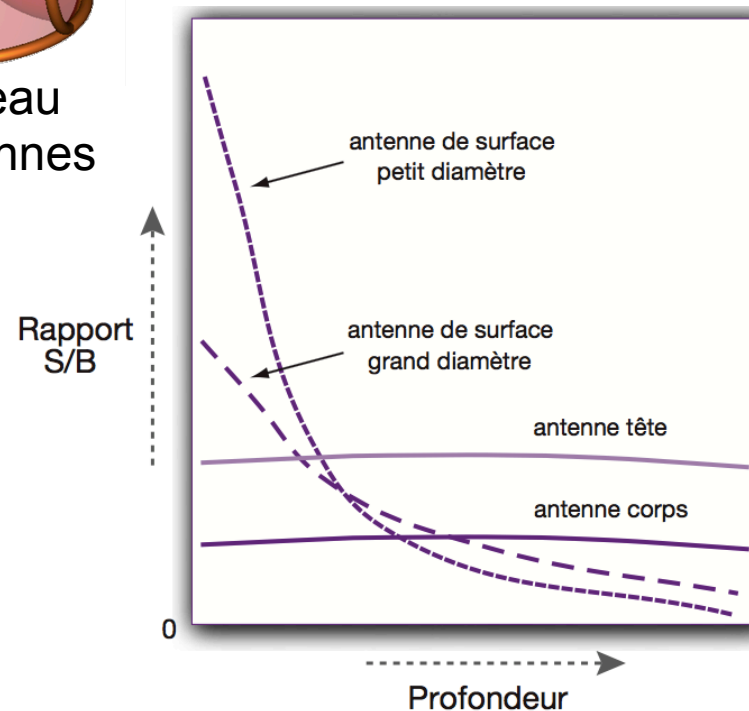
Antenne de volume



Antenne de surface

Réseau
d'antennes

- Réponse étendue
- SNR optimale



Réseau d'antennes

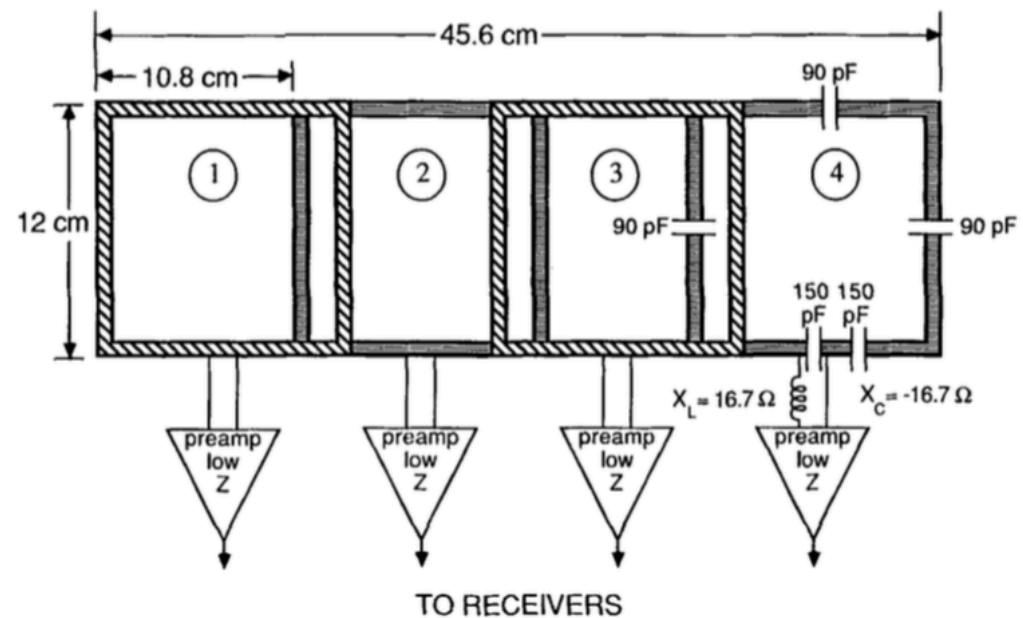
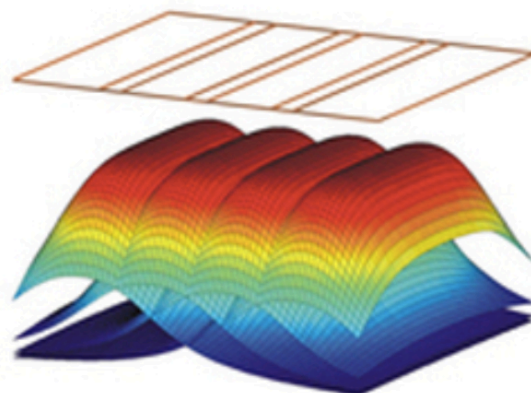
Phased array and parallel array

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



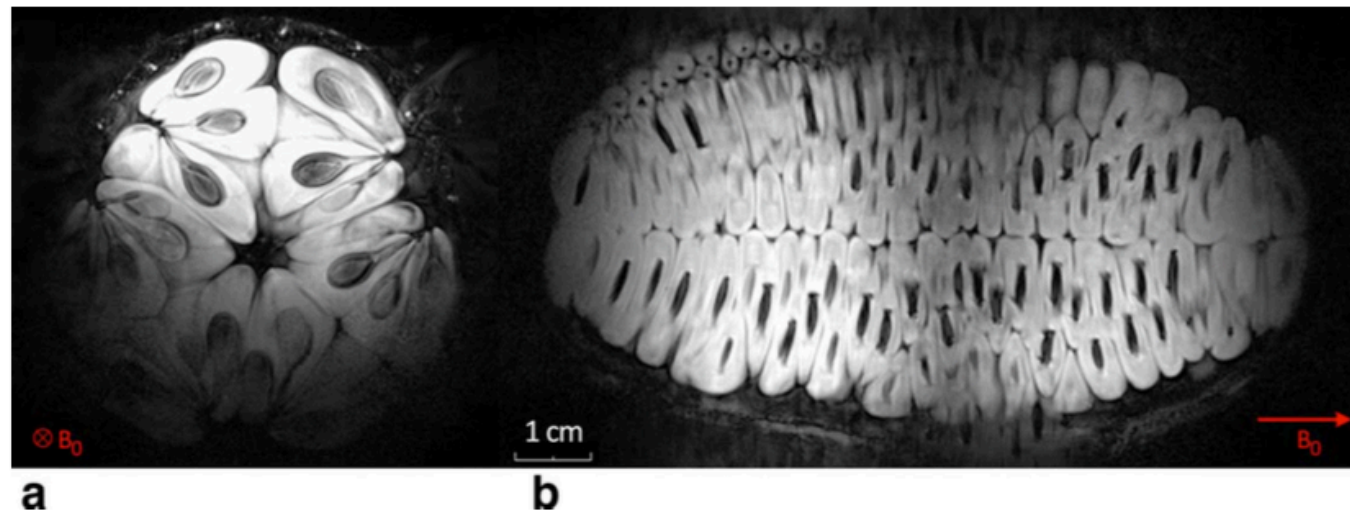
Réseau d'antennes

Phased array and parallel array

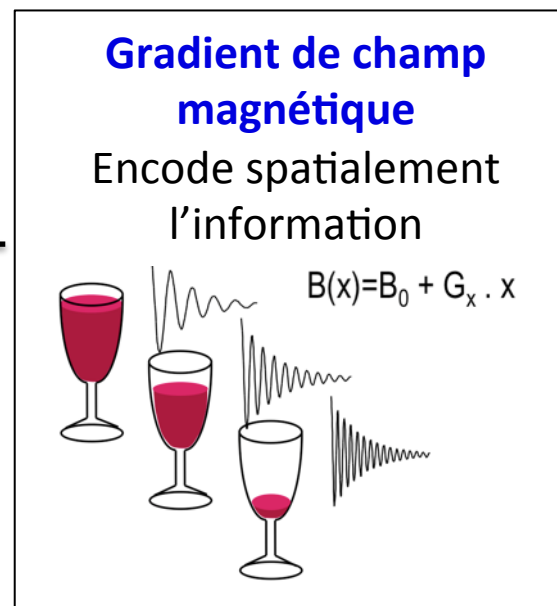
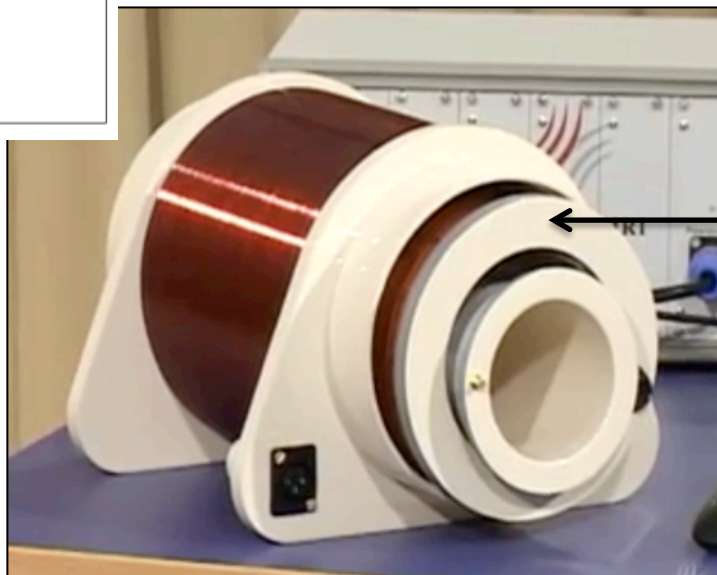
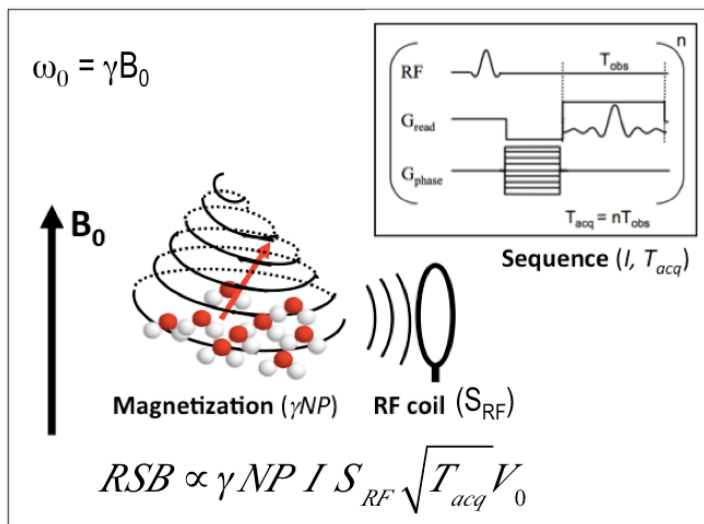
Array flat on torso phantom



Array bent on cylinder phantom



Instrumentation en l'IRM

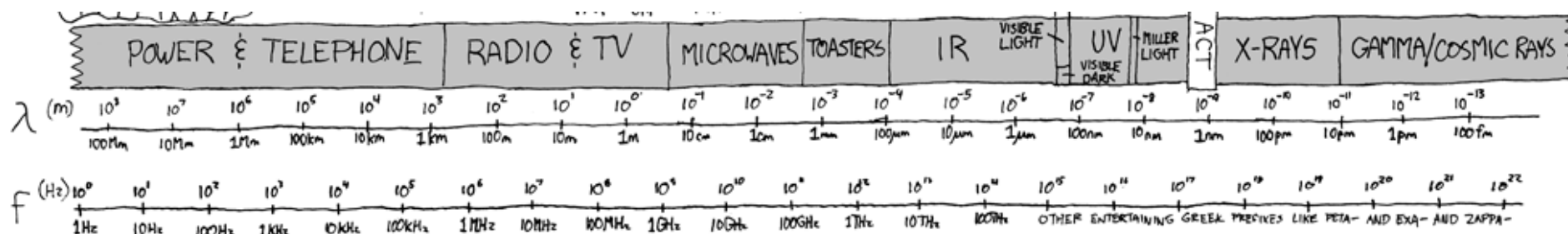


Gradient de champ magnétique

IRM : dépendance spatiale du signal RMN

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

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

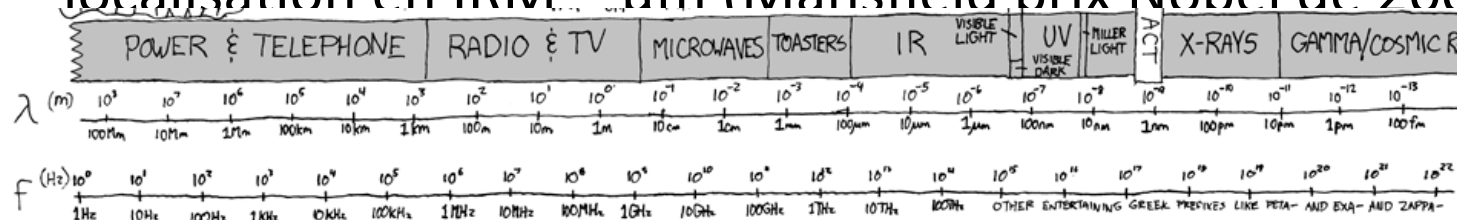


Gradient de champ magnétique

IRM : dépendance spatiale du signal RMN

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

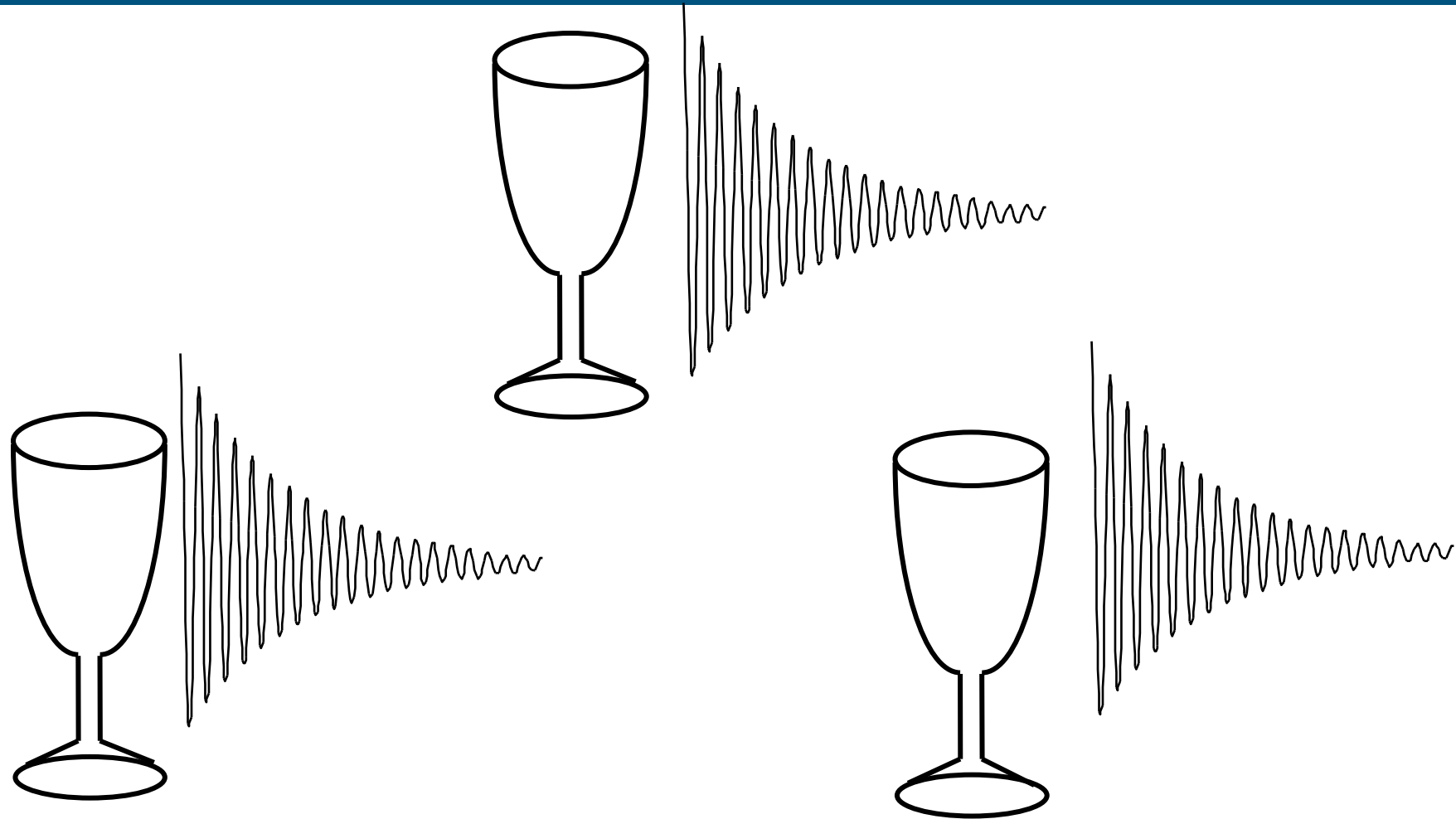
localisation en IRM $\sim \mu\text{m}$ (Mansfield prix Nobel de 2003)



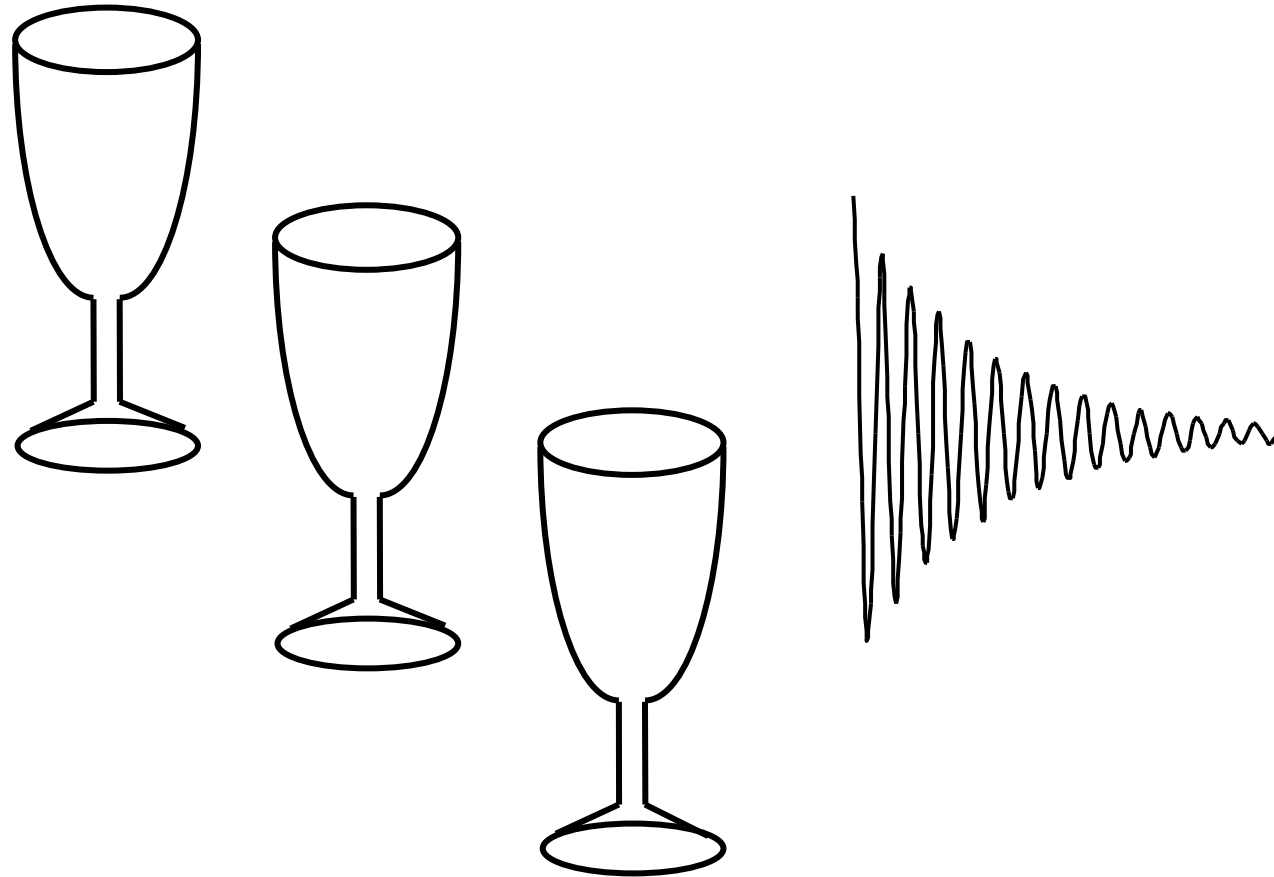
Modification de l'interaction des spins nucléaires avec le champ \rightarrow absorption des énergies légèrement différentes

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

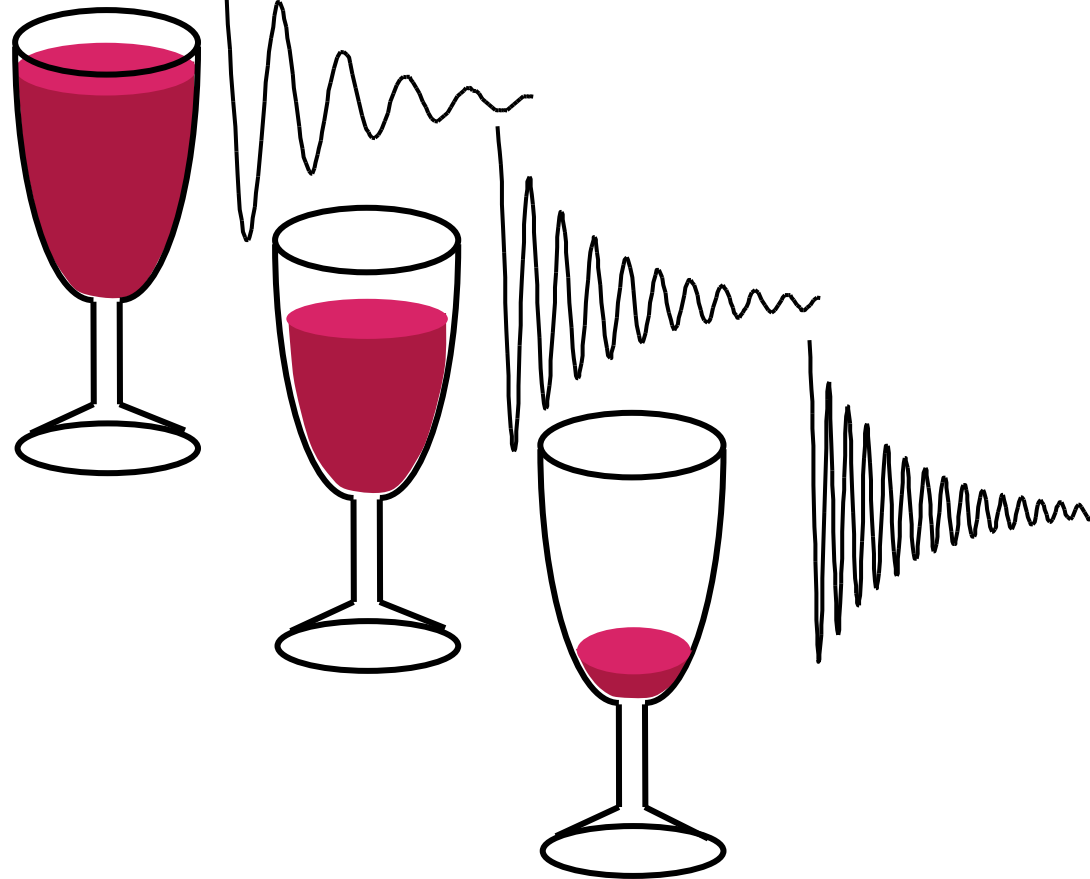
Localisation par la Distance



Localisation par la fréquence



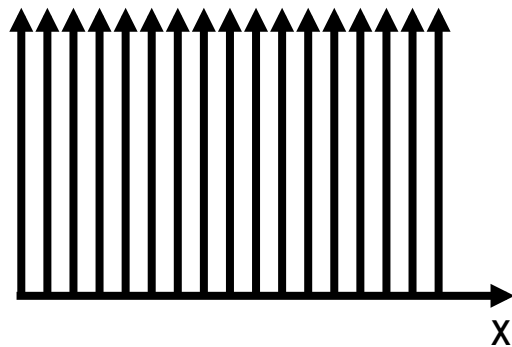
Localisation par la fréquence



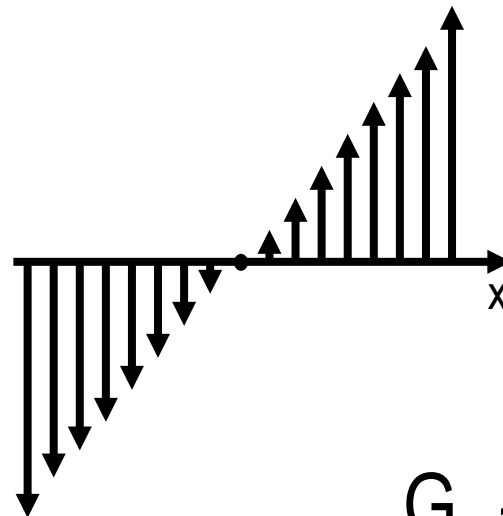
Localisation du signal RMN réalisée grâce à l'application de gradient produisant une variation linéaire et contrôlé de B_0 (direction z) et créant un petite perturbation du champ dans les 3 directions (x , y et z)

Gradient de Champ Magnétique

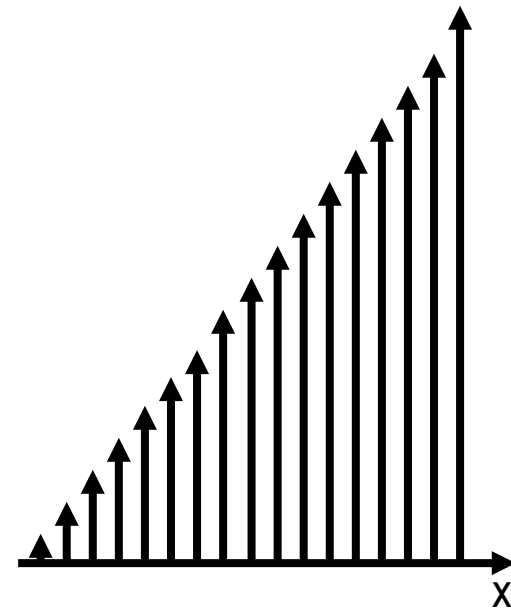
$$B(x) = B_0$$



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

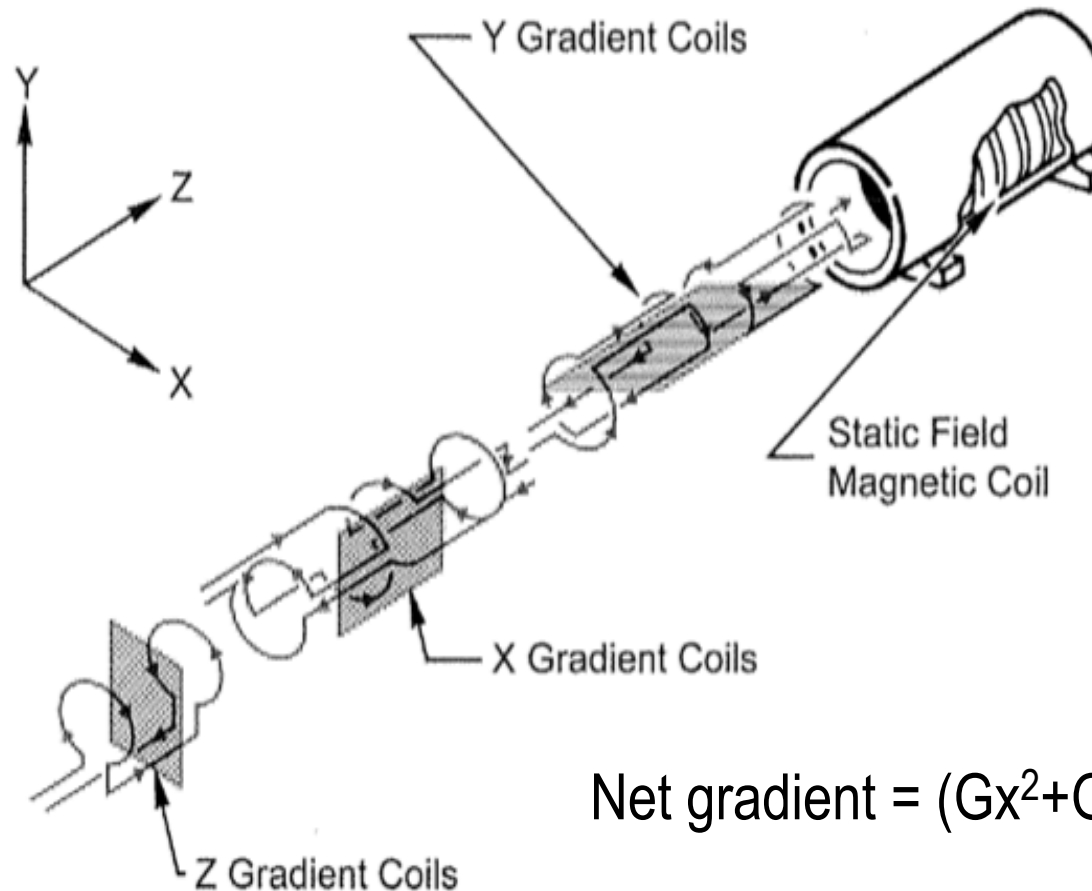


$$B(x) = B_0 + G_x \cdot x$$



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

Gradients de Champ Magnétique



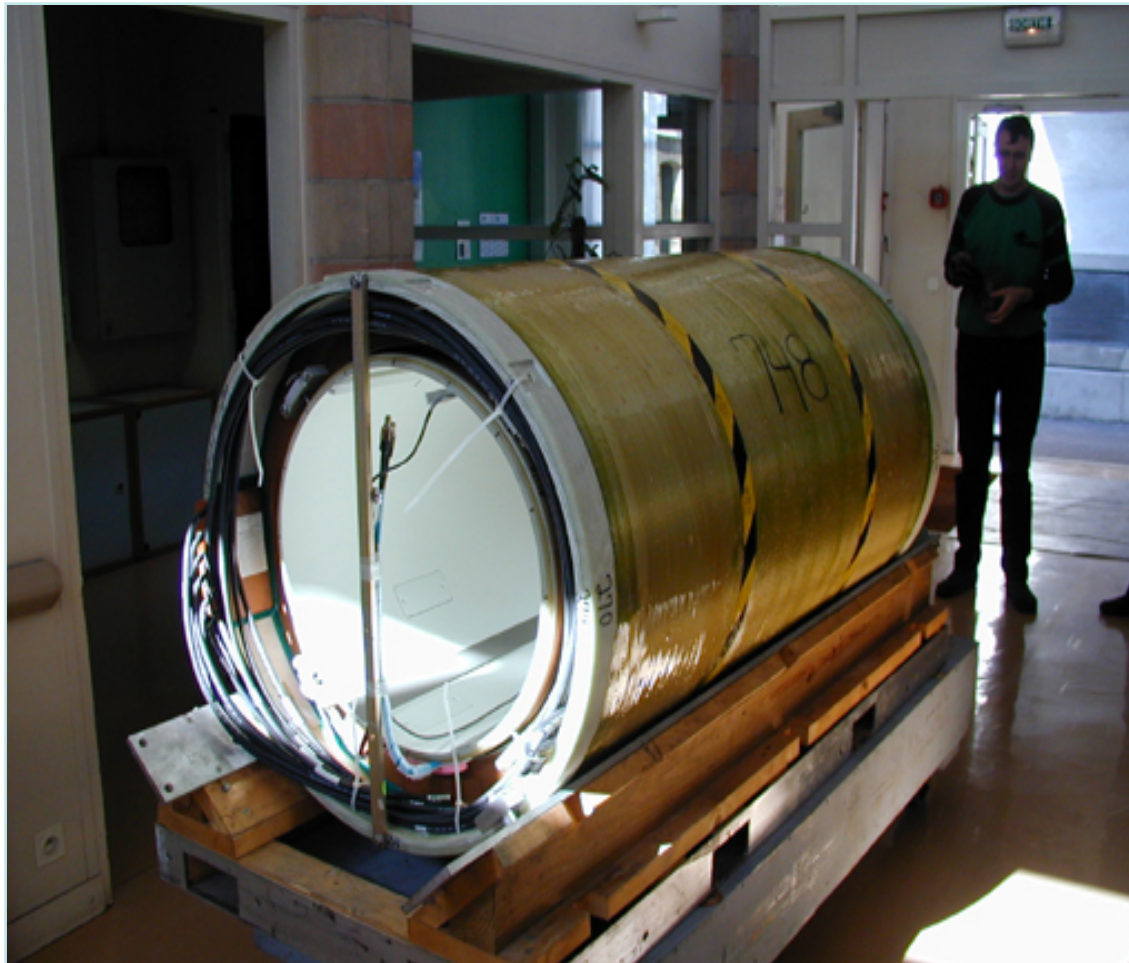
$$\text{Net gradient} = (G_x^2 + G_y^2 + G_z^2)^{1/2}$$

SMRT, vol.14, n.3

Bobines de gradient



Gradients of 23mT/m in 180 μ s ; 60cm bore



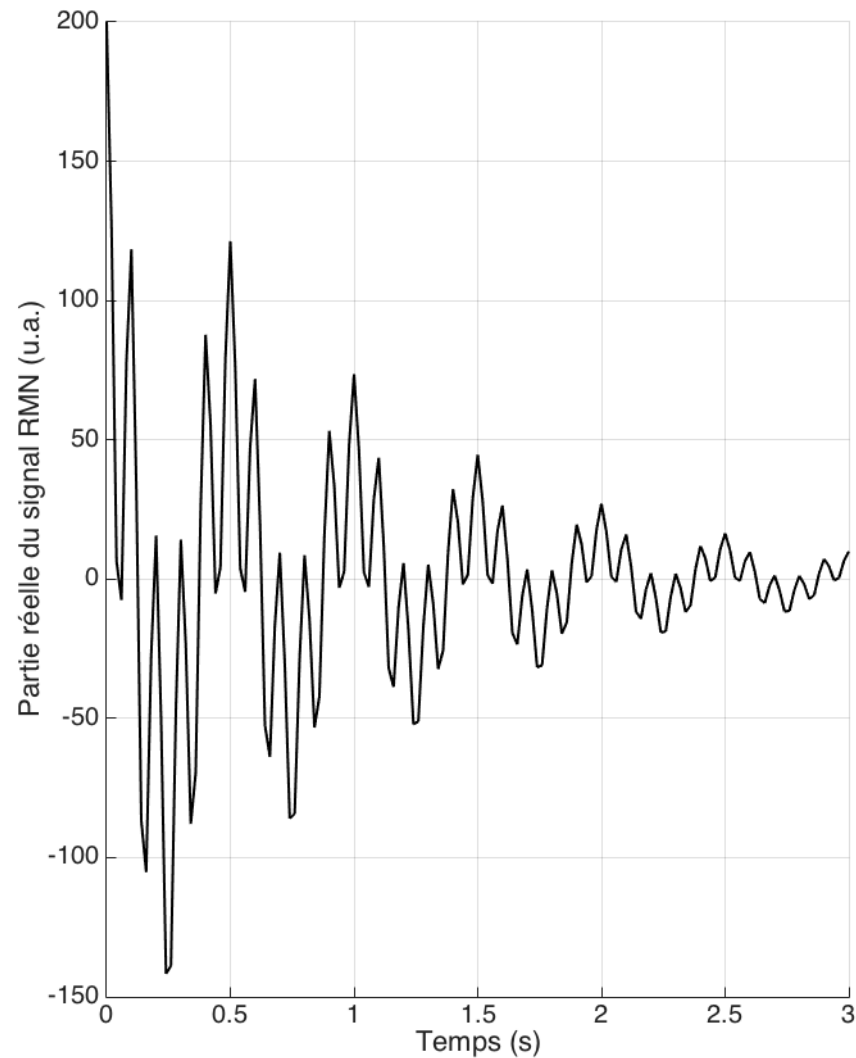
Gradient de Champ Magnétique

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?

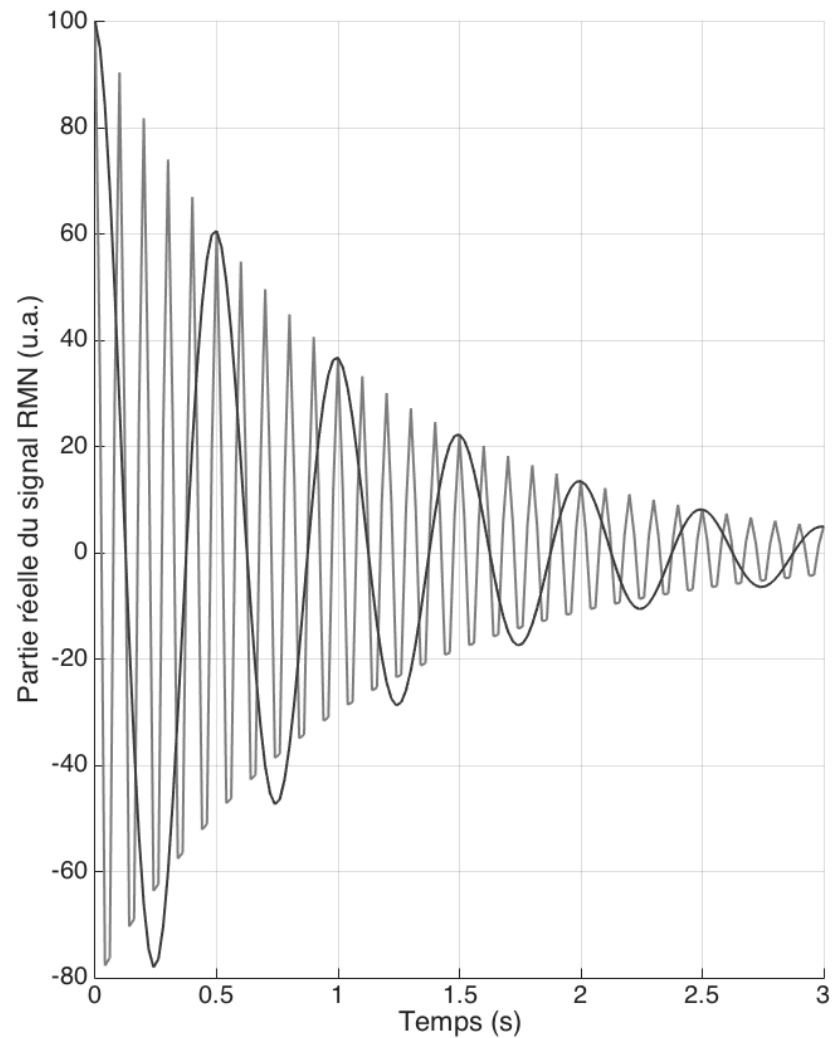
Gradient et selection spatial du signal



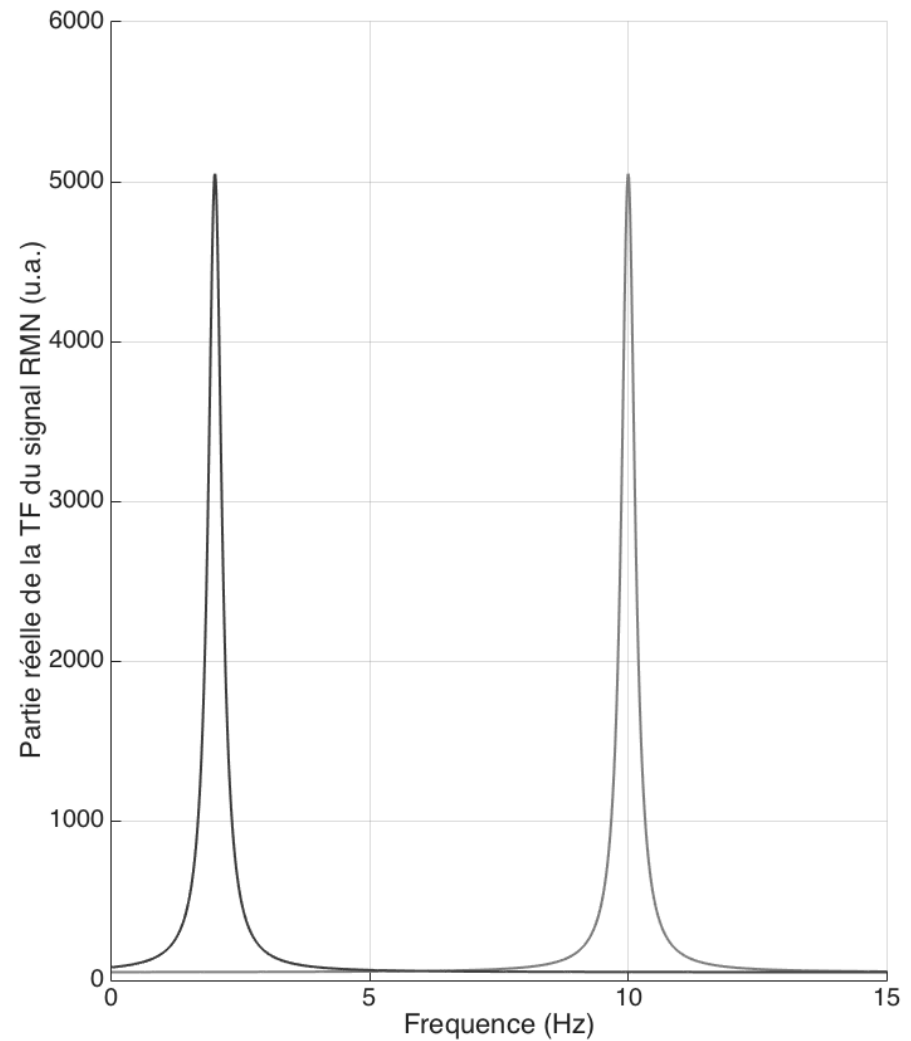
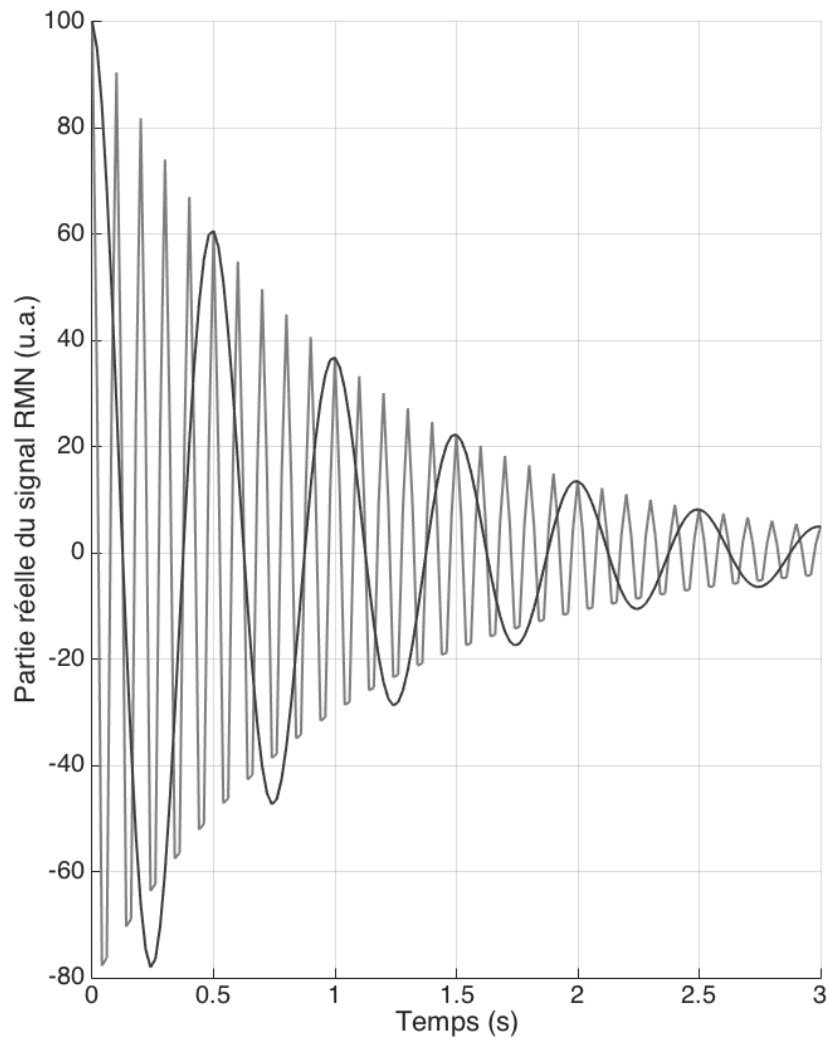
Gradient et sélection spatial du signal



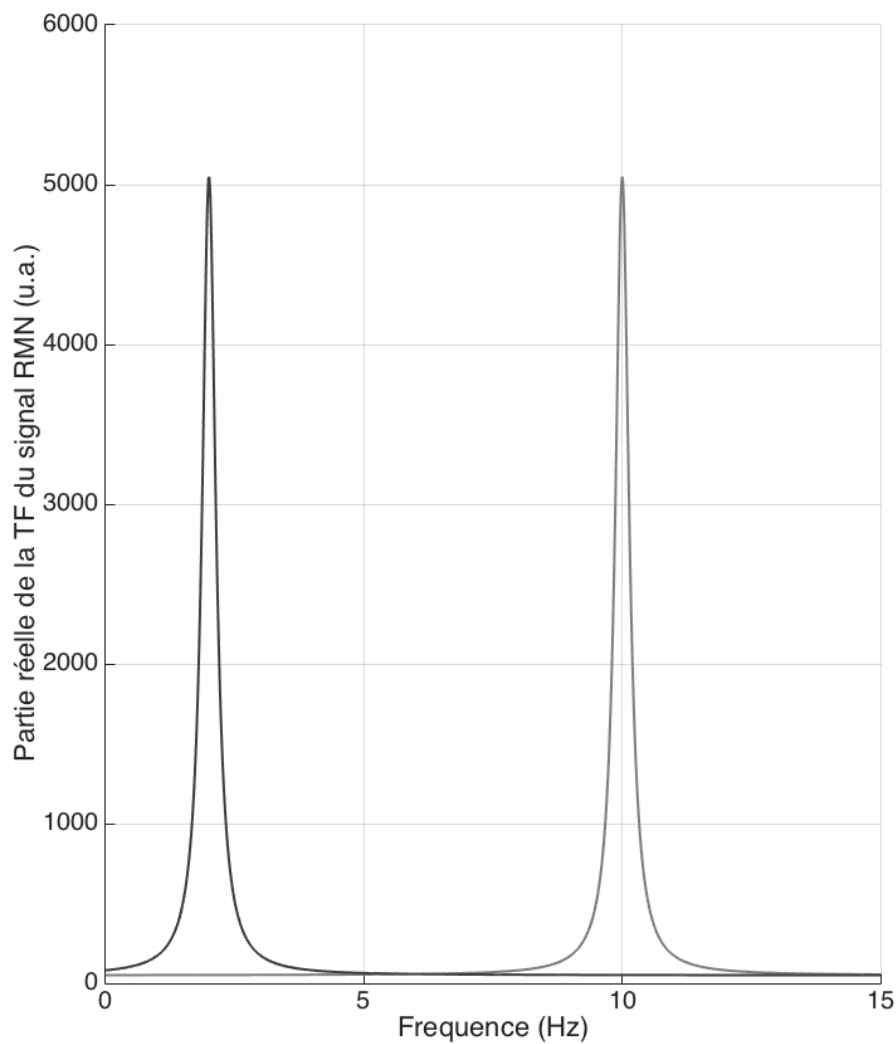
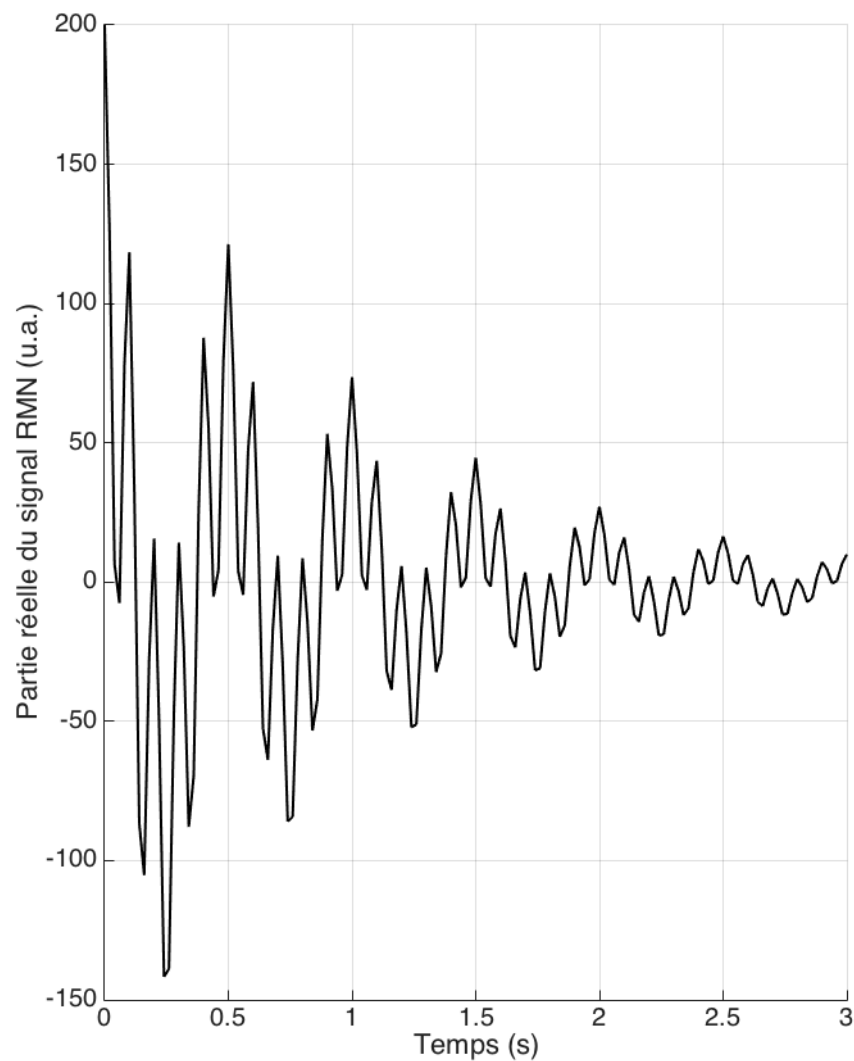
Gradient et sélection spatial du signal



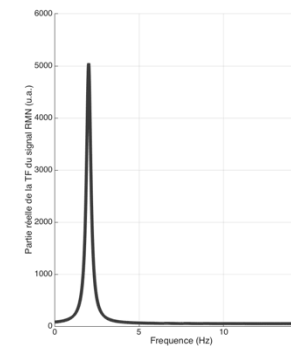
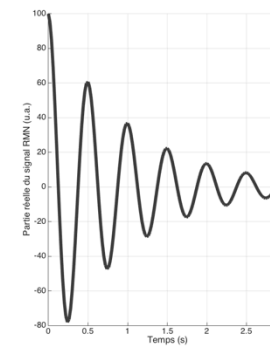
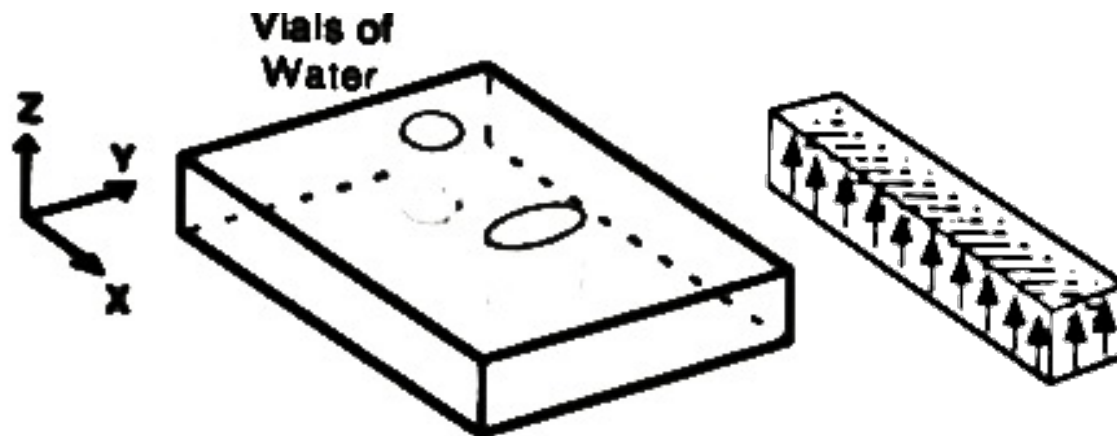
Gradient et sélection spatial du signal



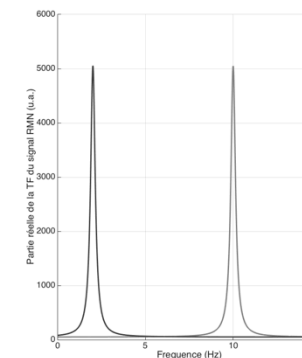
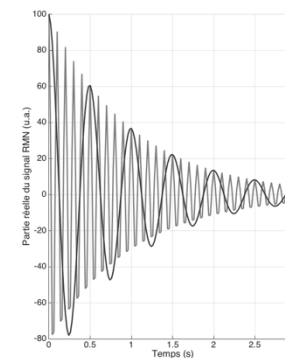
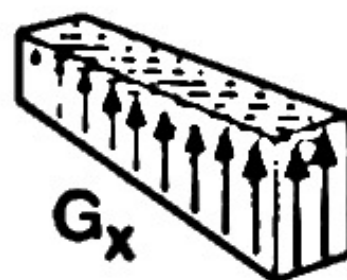
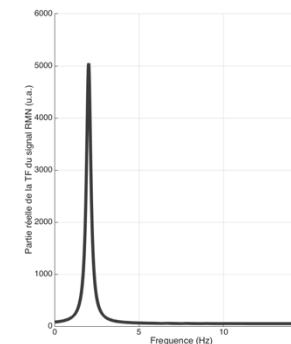
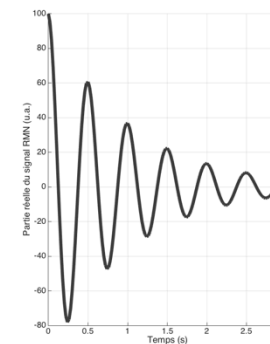
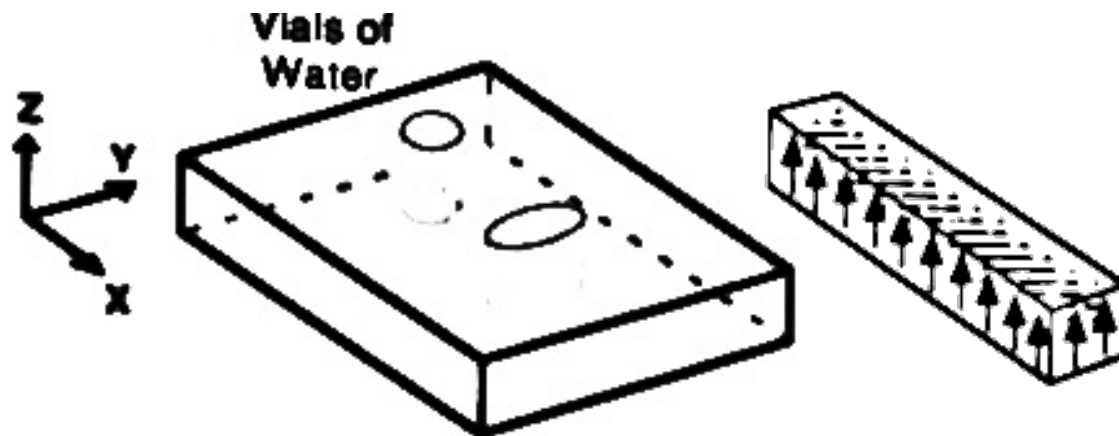
Gradient et sélection spatial du signal



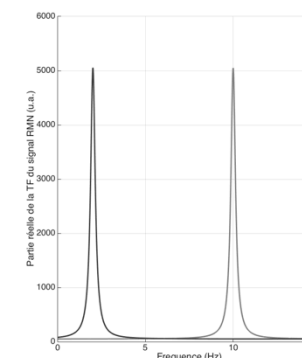
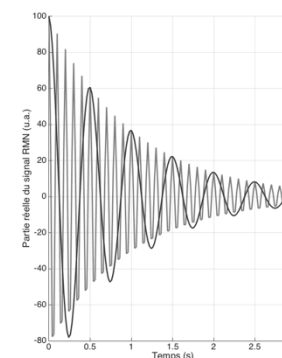
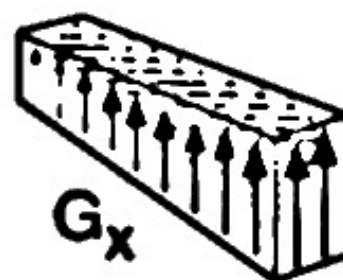
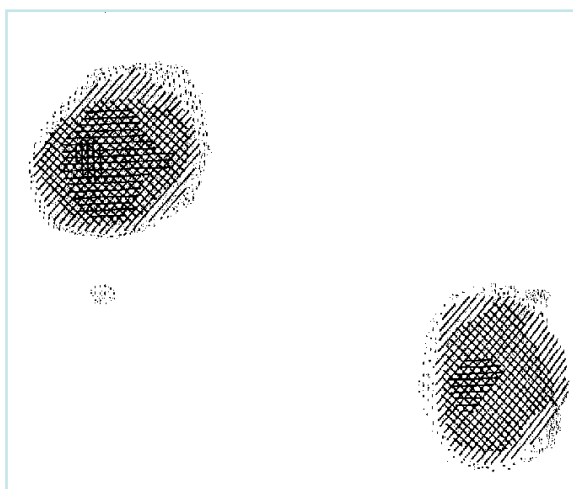
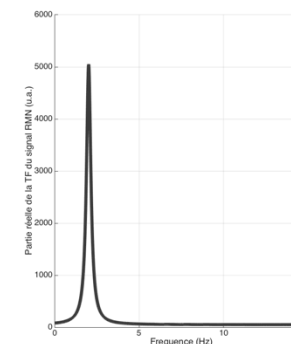
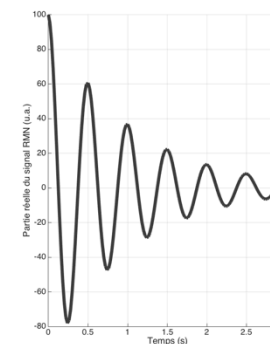
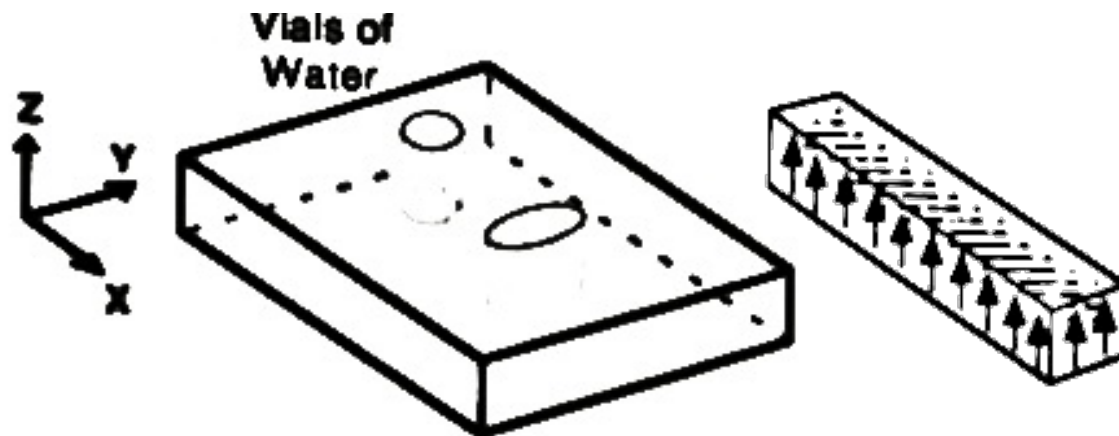
Encodage de fréquence



Encodage de fréquence

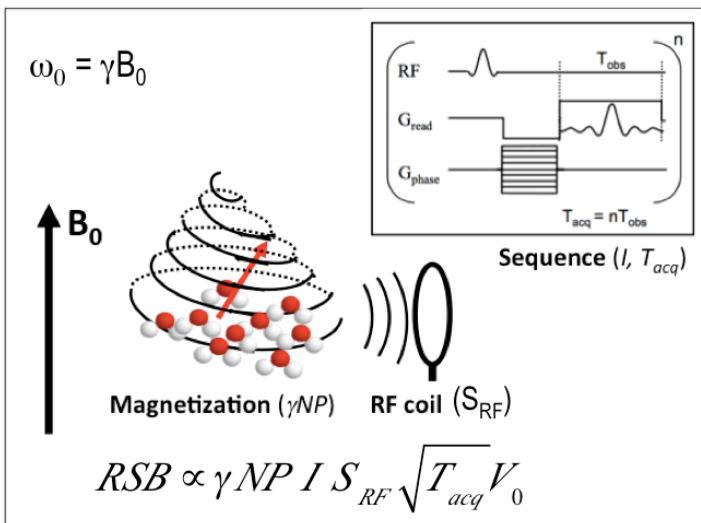


Encodage de fréquence



Lauterburg, 1973, Nature

Résumé l'IRM

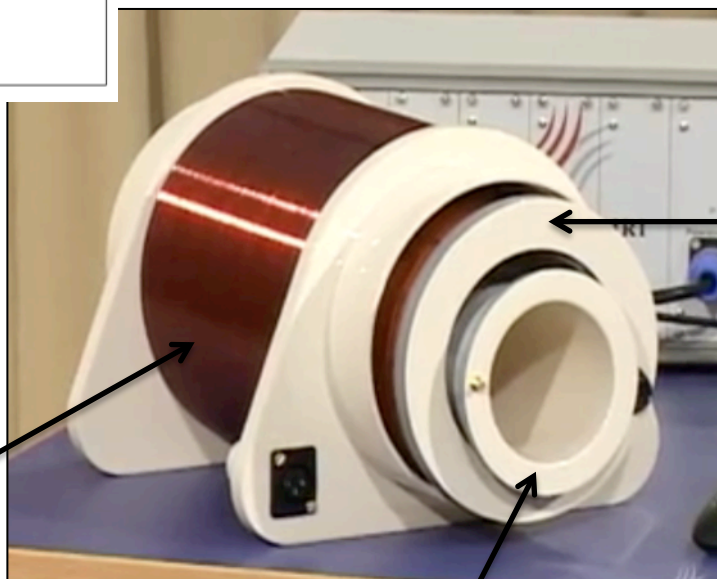


Relaxation longitudinale (T_1)

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

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

