

Un peu d'histoire

Le magnétisme
nucléaire

Action d'un champ
magnétique

Le phénomène de
résonance
magnétique

La relaxation

Le signal

Principe de l'écho
de spin

Le contraste en T1,
T2 et densité
protonique

Mise en place des
événements d'une
séquence

Les principes de l'IRM

"Intensif Remue Méninges"



B. KASTLER

Chef de service Radiologie Cardiaque et pulmonaire, sénologie et traitement
de la douleur CHU Besançon
Directeur UA 6834 Laboratoire I4S Université FC

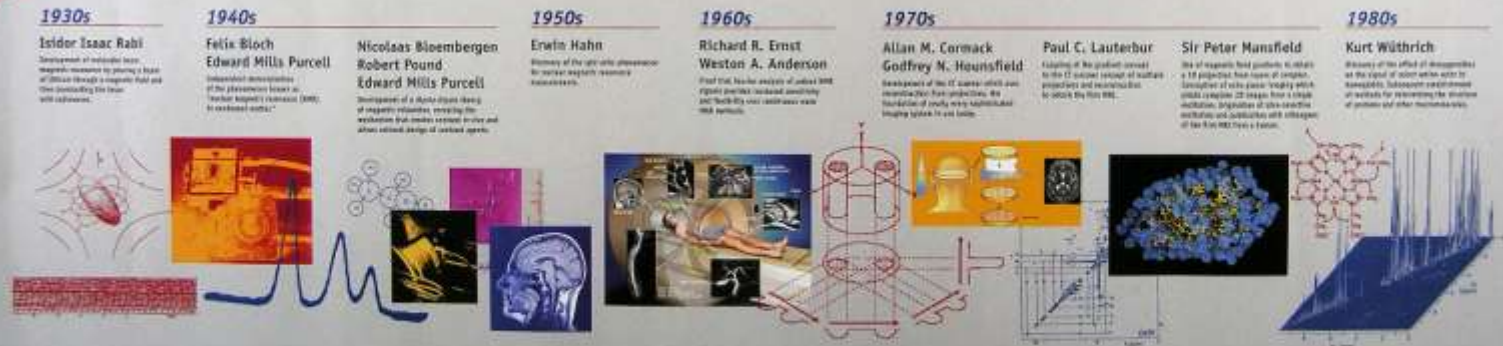
Un peu d'histoire

- 1946 : principe de la RMN décrit par deux équipes celle de Bloch à Stanford et de Purcell à Harvard (prix Nobel de physique en 1952).
- 1950 -1970 : applications en chimie et en biochimie in vitro.
- 1971 : Damadian montre que les T1 et T2 des tissus normaux et cancéreux sont différents.
- 1973 : Lauterbur réalise les premières images de deux tubes remplis d'eau.
- 1976 : Moor et Hinshaw réalisent les premières images humaines.
- 1976 : Mansfield met au point une technique d'imagerie ultra-rapide qui ne cessera de s'améliorer : l'échoplanar.
- 1982 : USA, 1985 : France.
- 2003 : prix Nobel décerné à Lauterbur et Mansfield.

Un peu d'histoire

Nobel Prizes in Magnetic Resonance

1944	1952	1991	2002	2003
				
				
Isidor Isaac Rabi Nobel Prize in Physics "for his resonance method for recording the magnetic properties of atomic nuclei"	Felix Bloch and Edward Mills Purcell Nobel Prize in Physics "for their development of new methods for nuclear magnetic resonance measurement and their contribution to the knowledge of the structure of matter"	Richard R. Ernst Nobel Prize in Chemistry "for his contributions to the development of the methodology of high-resolution nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy"	Kurt Wüthrich Nobel Prize in Chemistry "for his development of nuclear magnetic resonance spectroscopy for determining the three-dimensional structure of biological macromolecules in solution"	Paul C. Lauterbur and Sir Peter Mansfield Nobel Prize in Physiology or Medicine "for their discoveries concerning magnetic resonance imaging"



Timeline of the Chain of Research that Led to the Development of MRI

International Society for Magnetic Resonance in Medicine • 2118 Milvia Street, Suite 201, Berkeley, California 94704 USA • <http://www.ismrm.org>

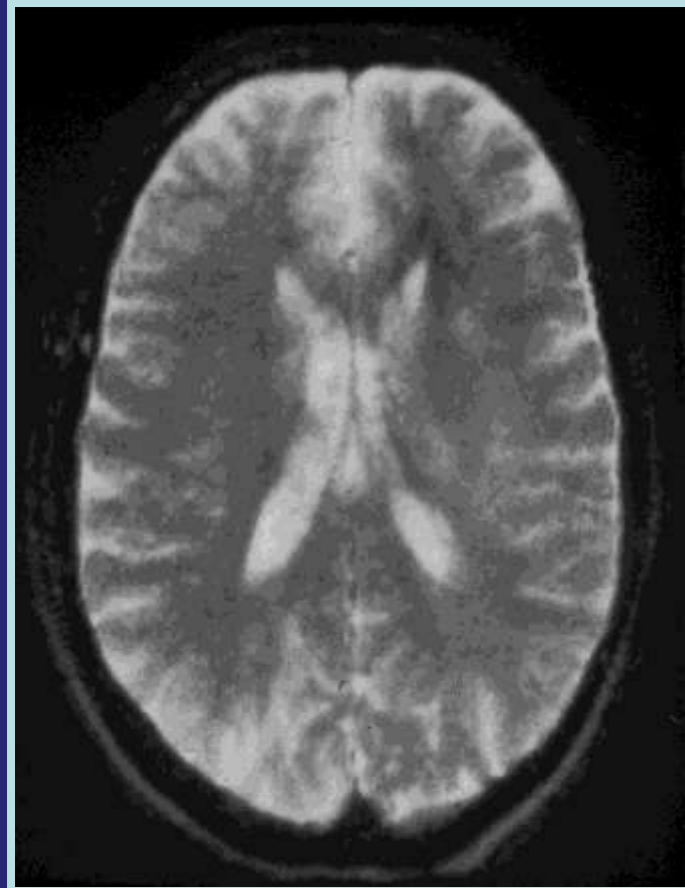
Sinaia

Summer School on MRI and
MRS (20-22/06/2005)



(Bloch, Hansen) **George Packard (1946)**

- 1982 : USA,
1985 : FRANCE



1986

Magnétisme

Un peu d'histoire

Le magnétisme
nucléaire

Action d'un champ
magnétique

Le phénomène de
résonance
magnétique

La relaxation

Le signal

Principe de l'écho
de spin

Le contraste en T1,
T2 et densité
protonique

Mise en place des
événements d'une
séquence

3 Niveaux:

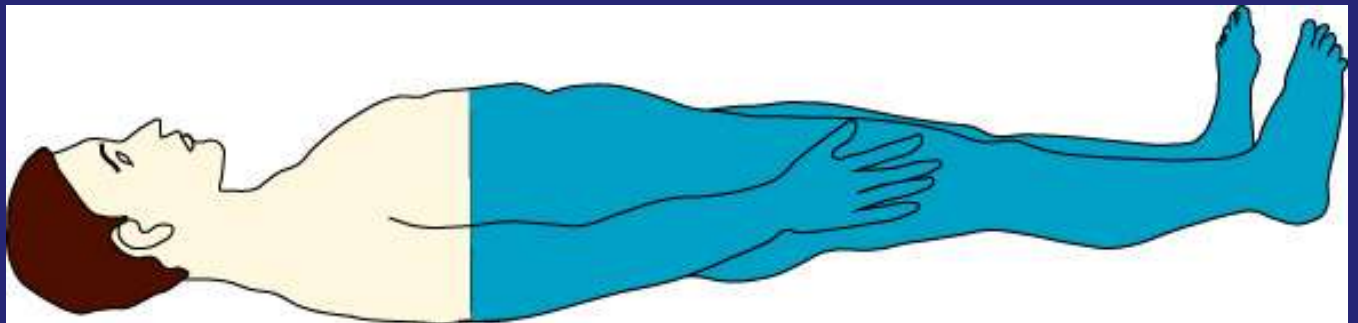
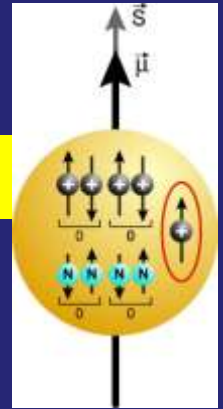
1) Nucleaire

2) Champ magnétique statique B_0

3) Champ magnétique B_1 : onde RF

champ magnétique / électricité

L'organisme est constitué de 2/3 d'eau.



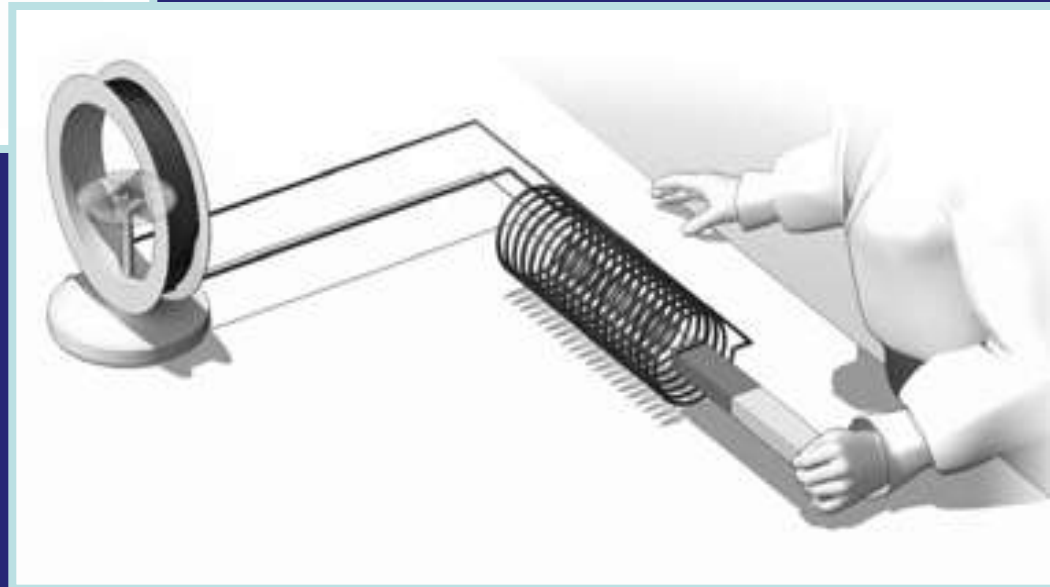
En imagerie, on va s'intéresser au **noyau d'hydrogène ? (1 proton)**

⇒ IRM « protonique ».

MAGNETISME NUCLEAIRE

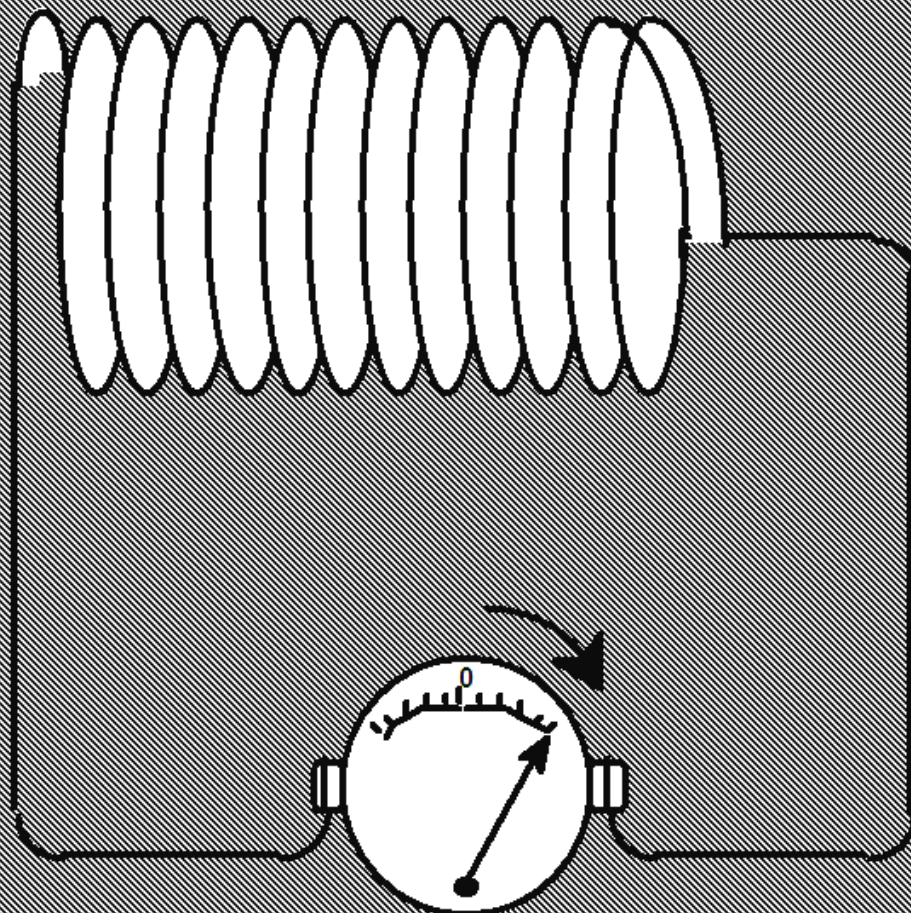
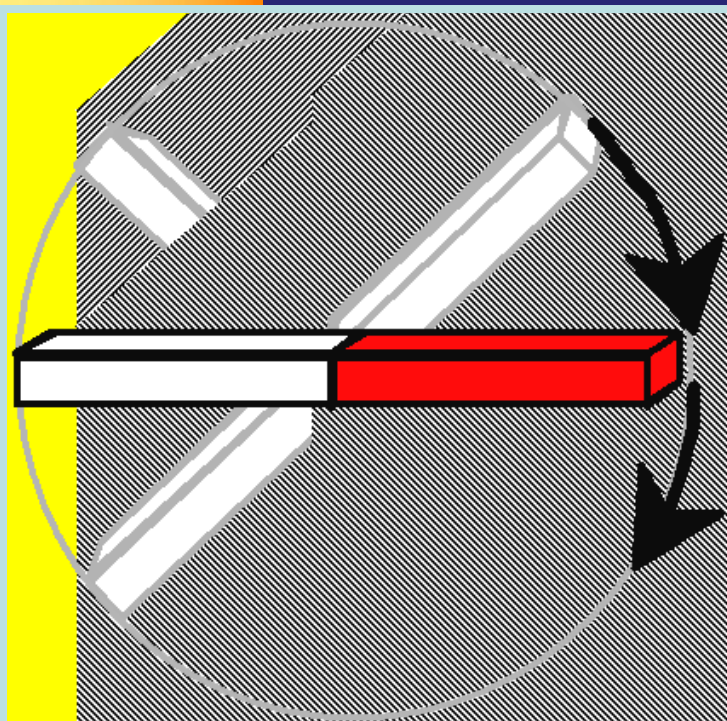
- Réciprocité : magnétisme et déplacement d'une charge électrique

Oersted 1820 Faraday 1831



MAGNETISME NUCLEAIRE

- Réciprocité magnétisme et déplacement d'une charge électrique:
- **Un courant électrique** (déplacement d'électrons de charge négative) dans un fil conducteur induit une force magnétique ou **champ magnétique** (B_0).
- De même, un **champ magnétique en mouvement** engendre un **courant électrique** (Signal IRM).
- Dynamo de bicyclette - moteur électrique.



bobine

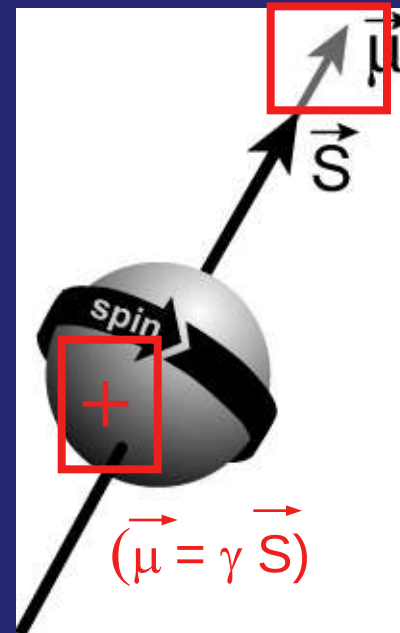
aimant

Ça tourne

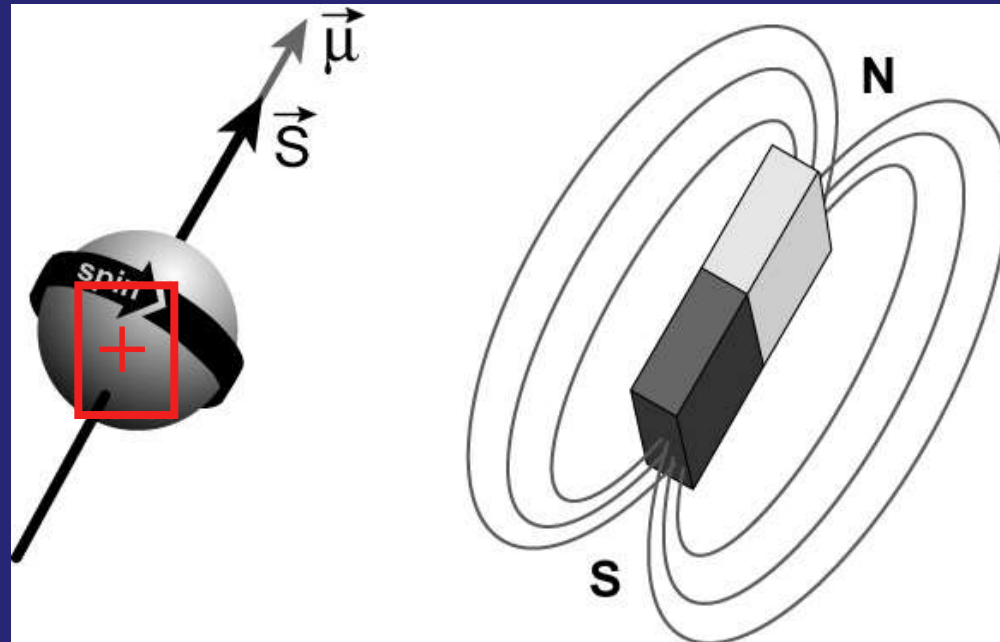
1) Magnétisme nucléaire

- Noyau constitué de protons
- Rotation autour de leur axe possèdent un **moment cinétique intrinsèque** appelé **spin**, représenté par un **vecteur $\vec{S}$** (propriété toupie).

Proton possède de plus une charge + qui en rotation induit autour d'elle un champ magnétique appelé moment magnétique, représenté par le **vecteur $\vec{\mu}$** d'aimantation microscopique. ($\vec{S}$ et $\vec{\mu}$)



protons **petits aimants**,



Soumis à un **champ magnétique** ($\vec{B}_0$), ils vont **s'aligner**
-en prenant **2 orientations**, en fonction de leur spin
 $1/2$ ($2I + 1$ orientations pour un spin I)

Un peu d'histoire

Le magnétisme nucléaire

Action d'un champ magnétique

- Le champ statique B_0

- Répercussion sur un seul proton

- Répercussion sur un échantillon de protons

Le phénomène de résonance magnétique

La relaxation

Le signal

Principe de l'écho de spin

Le contraste en T1, T2 et densité protonique

Mise en place des événements d'une séquence

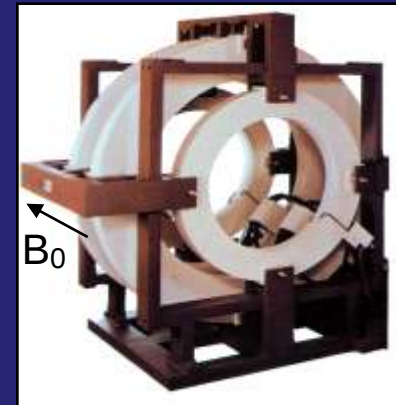
MAGNETISME CHAMP B_0



2) champ magnétique intense $\vec{B}_0$.



Aimant permanent



Aimant résistif



Aimant supraconducteur



Aimant dédié

de 0,02 à 3 T et plus !

Effet cible !!!



Aimant permanent



Surveillance (aimant tunnel)

→ Effet cible!

→ Interphone

→ Caméra vidéo

→ Poire d'appel



CONTRE-INDICATIONS

RELATIVES

PROTHESE METALLIQUE

AGITATION

CLAUSTROPHOBIE

OBESITE

ABSOLUES

**PACE-MAKER ET
NEUROSTIMULATEUR**

**CORPS ETRANGER
METALLIQUE
INTRA-OCULAIRE**

**CLIP VASCULAIRE
FERRO-
MAGNETIQUE
INTRA-CRANIEN**

Un peu d'histoire

Le magnétisme nucléaire

Action d'un champ magnétique

- Le champ statique B_0
- Répercussion sur un seul proton
- Répercussion sur un échantillon de protons

Le phénomène de résonance magnétique

La relaxation

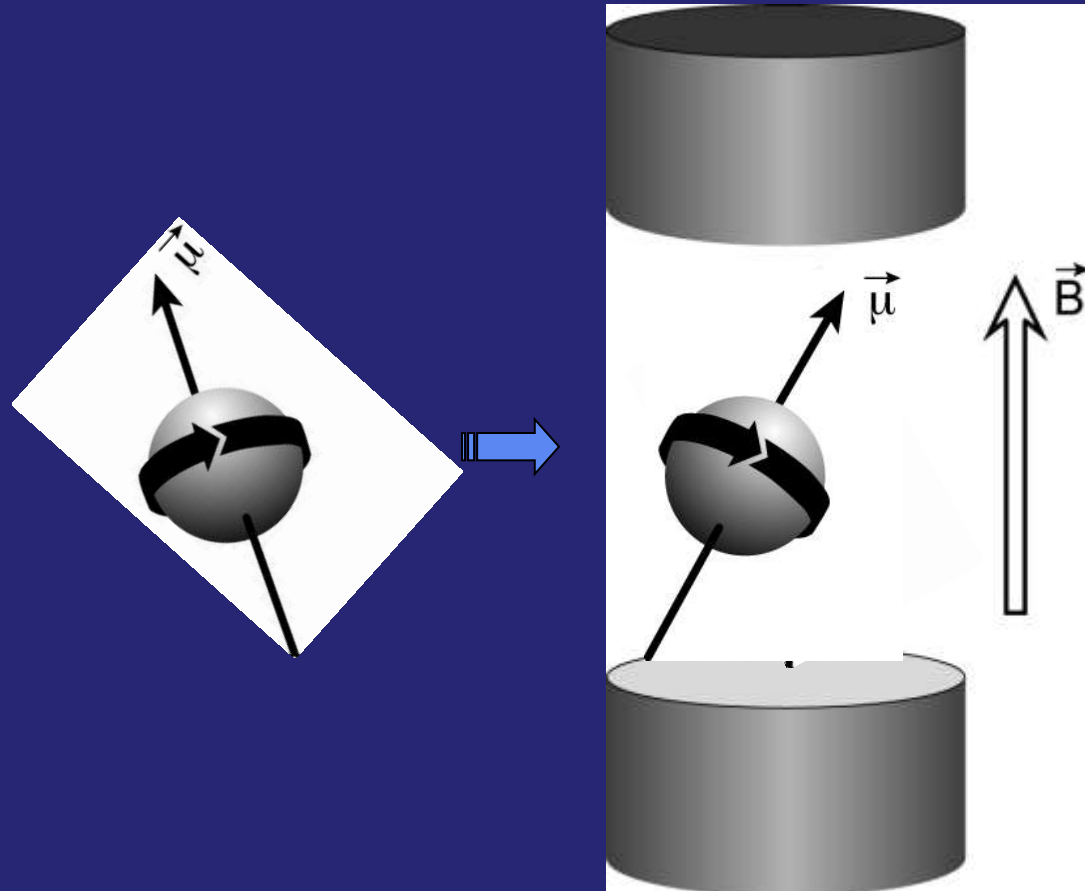
Le signal

Principe de l'écho de spin

Le contraste en T1, T2 et densité protonique

Mise en place des événements d'une séquence

2) Lorsqu'on place un **proton** dans un champ magnétique intense $\vec{B}_0$



Alignement selon B_0 (angle et deux orientations)

Un peu d'histoire

Le magnétisme
nucléaire

Action d'un champ
magnétique

- Le champ statique B_0
- Répercussion sur un seul proton

- Répercussion sur un
échantillon de protons

Le phénomène de
résonance
magnétique

La relaxation

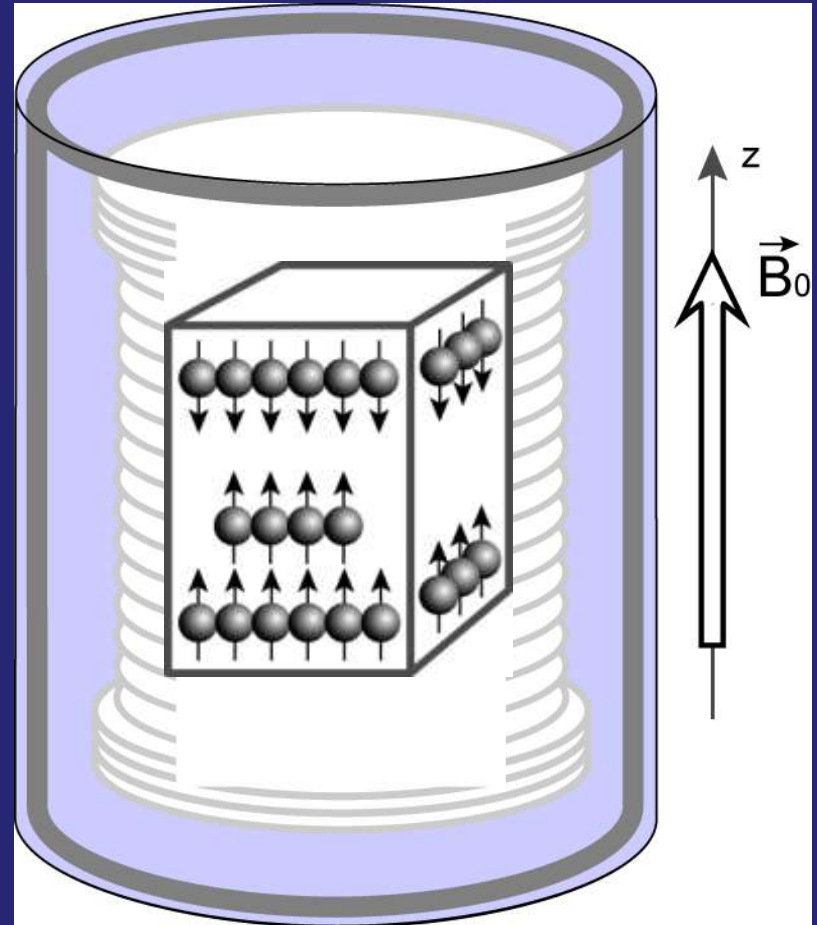
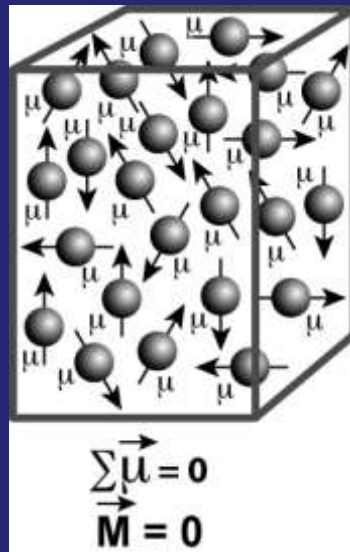
Le signal

Principe de l'écho
de spin

Le contraste en T1,
T2 et densité
protonique

Mise en place des
événements d'une
séquence

2) Lorsqu'on place un échantillon de protons dans B_0



Ils vont se répartir en deux populations sensiblement égales, parallèles et antiparallèles, avec un petit excès de protons pour la position parallèle.

Un peu d'histoire

Le magnétisme nucléaire

Action d'un champ magnétique

- Le champ statique B_0
- Répercussion sur un seul proton

- Répercussion sur un échantillon de protons

- Aspect vectoriel
- Aspect quantique
- Composantes de l'aimantation tissulaire

Le phénomène de résonance magnétique

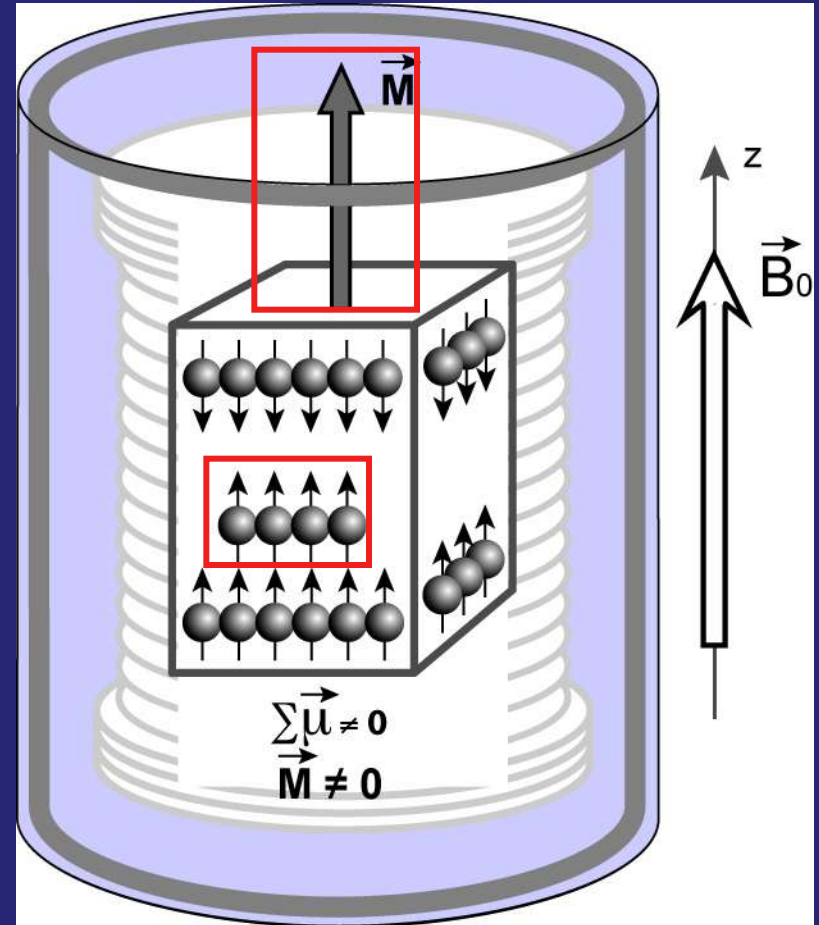
La relaxation

Le signal

Le contraste en T1, T2 et densité protonique

Ce **surnombre de protons** en position **parallèle** est à l'origine de l'apparition d'un **vecteur d'aimantation macroscopique $\vec{M}$** non nul

faible : environ 4 pour 2 millions de protons, à 0,5 T et à température corporelle



Dans 1 cm^3 d'eau ($6,69 \cdot 10^{23}$ protons), la quantité de protons en surnombre est de $1,34 \cdot 10^{17}$, soit environ **134 millions de milliards de protons** !

Un peu d'histoire

Le magnétisme
nucléaire

Action d'un champ
magnétique

Le phénomène de
résonance
magnétique

La relaxation

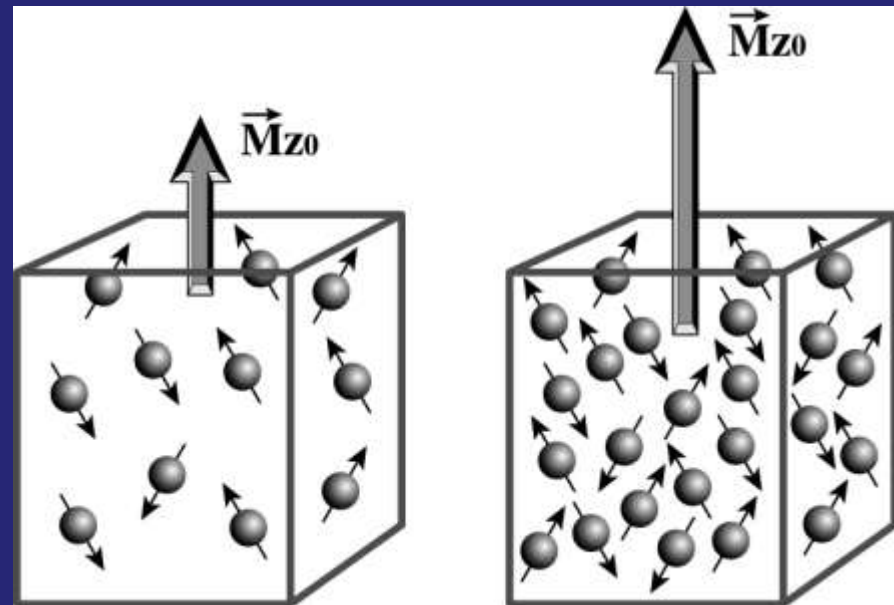
Le signal

Principe de l'écho
de spin

Le contraste en T1,
T2 et densité
protonique

valeur de $\vec{M}_{z0}$?

- La densité de
protons des tissus



Un peu d'histoire

Le magnétisme
nucléaire

Action d'un champ
magnétique

Le phénomène de
résonance
magnétique

La relaxation

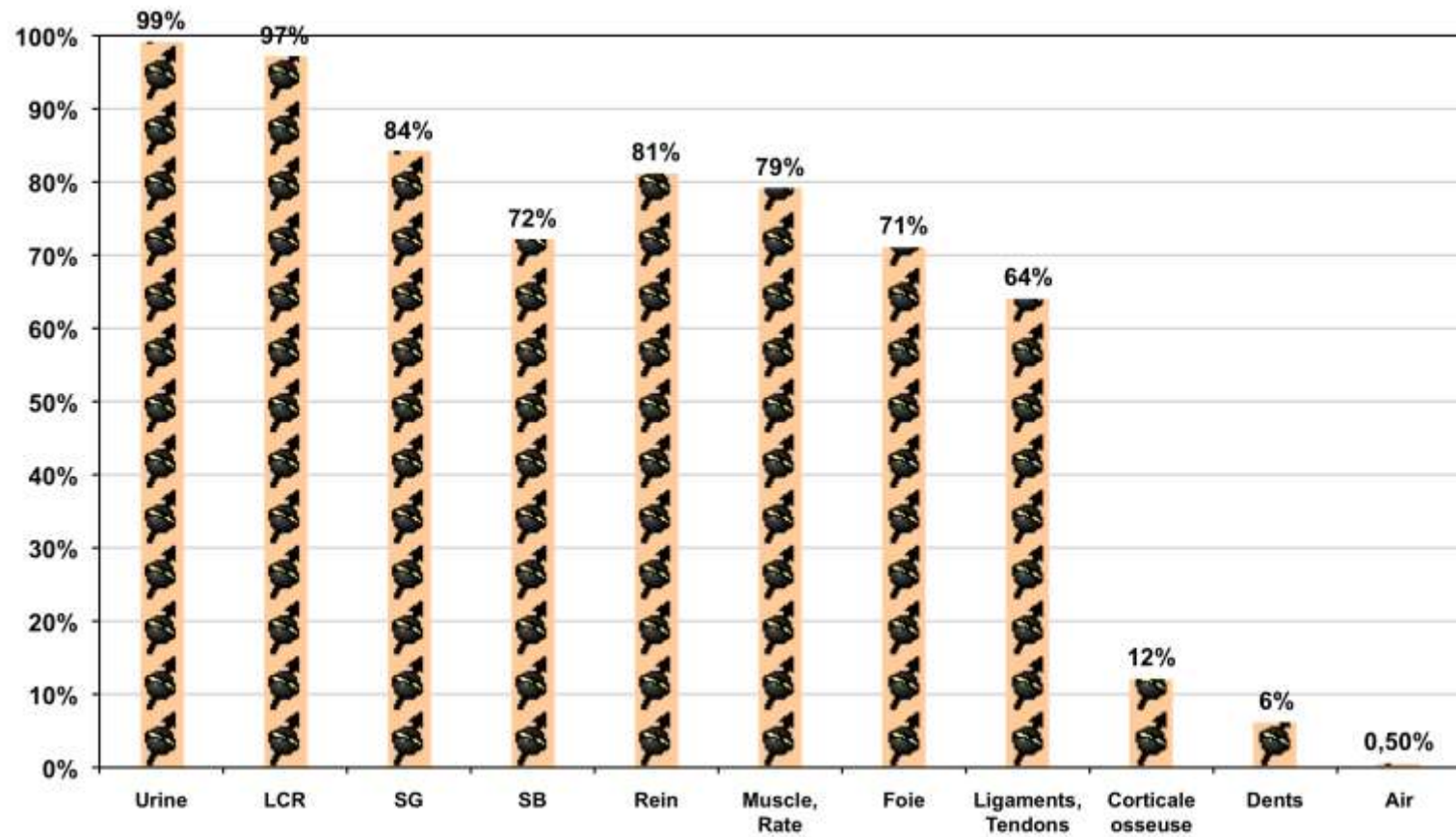
Le signal

Principe de l'écho
de spin

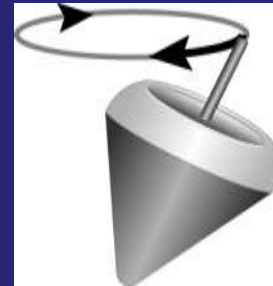
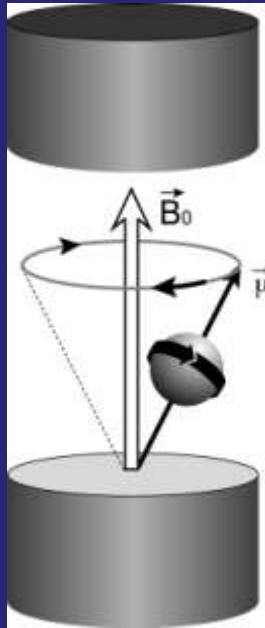
Le contraste en T1,
T2 et densité
protonique

- Influence du TR
- Influence du TE
- Pondération en T1
- Pondération en ρ
- Pondération en T2

La teneur en eau de différents **tissus biologiques** permet d'évaluer leurs différences en **densité de protons** :



Mz_0 va se mettre à tourner de l'axe de ce champ magnétique



$$\omega_0 = \gamma \cdot B_0$$

Relation de LARMOR

C'est le mouvement de *précession*

Il s'apparente à celui d'une *toupie*

Un peu d'histoire

Le magnétisme nucléaire

Action d'un champ magnétique

- Le champ statique B_0
- Répercussion sur un seul proton

-Répercussion sur un échantillon de protons

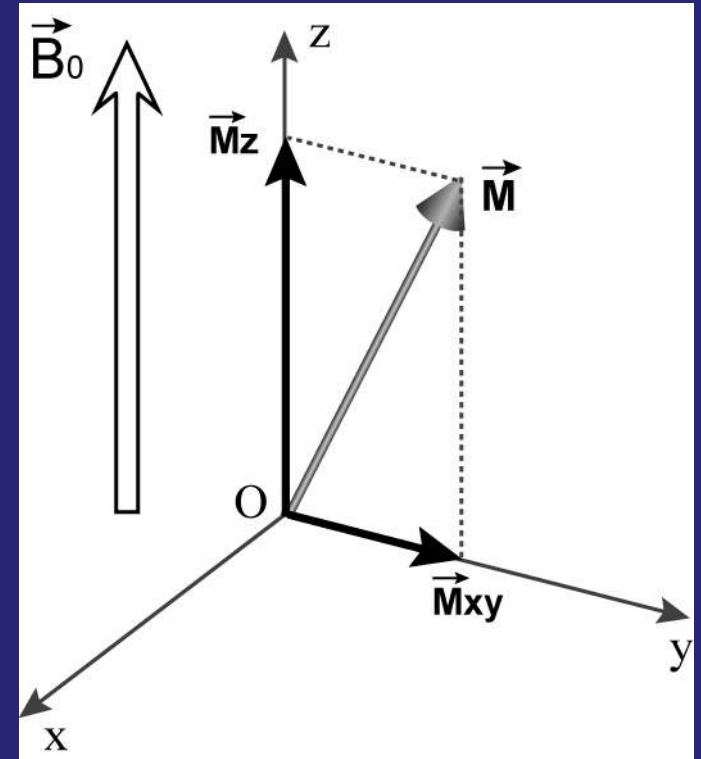
- Aspect vectoriel
- Aspect quantique
- Composantes de l'aimantation tissulaire

Le phénomène de résonance magnétique

La relaxation

Le signal

$\vec{M}$ macroscopique
(sommes 4 protons)
aussi un mouvement
de précession autour
de B_0 à la fréquence
 ω_0) ($2\pi\nu_0$)



$\vec{M}_z = \text{aimantation longitudinale}$

$\Rightarrow$ projection de M suivant l'axe de B_0 que l'on choisit habituellement comme axe Oz

$\vec{M}_{xy} = \text{aimantation transversale}$

$\Rightarrow$ projection de M dans un plan xOy perpendiculaire à B_0

Un peu d'histoire

Le magnétisme
nucléaire

Action d'un champ
magnétique

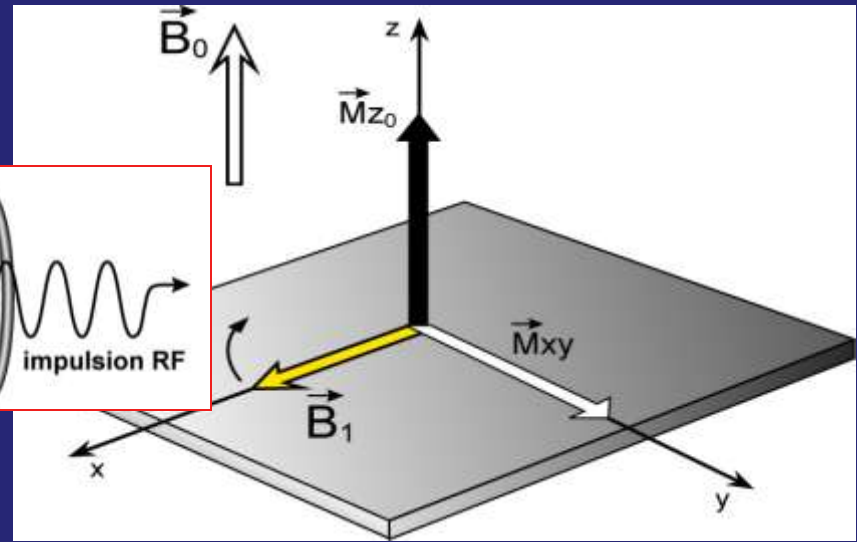
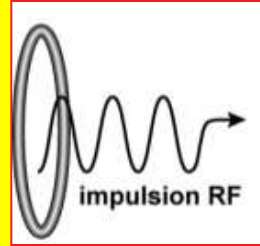
Le phénomène de
résonance
magnétique

- La résonance
- Répercussion sur M_z
- Répercussion sur M_{xy}
- Répercussion sur M

La relaxation

Le contraste en T_1 ,
 T_2 et densité
protonique

**3) champ
magnétique
tournant $\vec{B}_1$**
(mécanique
classique) ou **onde
électromagnétique
RF**



$(\omega_0 = 63,8 \text{ Mhz à } 1,5 \text{ T})$

Pour qu'il y ait **transfert d'énergie** au système en état d'équilibre, il faut que la **fréquence de rotation ω_r** du champ magnétique tournant B_1 (ou la fréquence de l'onde électromagnétique) soit **égale** à la **fréquence de Larmor ω_0** : c'est la **condition de résonance**.

$$\omega_r = \omega_0 = \gamma \cdot B_0$$

$$E = h\nu_r = \Delta E$$

Un peu d'histoire

Le magnétisme
nucléaire

Action d'un champ
magnétique

Le phénomène de
résonance
magnétique

La relaxation

Le signal

exemples de phénomènes de résonance :

- Pour **pousser un enfant sur une balançoire** (transfert d'énergie de l'adulte à l'enfant), il faut le faire avec une fréquence adaptée (en résonance) à la fréquence propre de la balançoire.

- Une **onde sonore peut briser un verre** : lorsque le verre entre en résonance, l'énergie relativement faible des vibrations sonores est amplifiée jusqu'à faire éclater le verre.

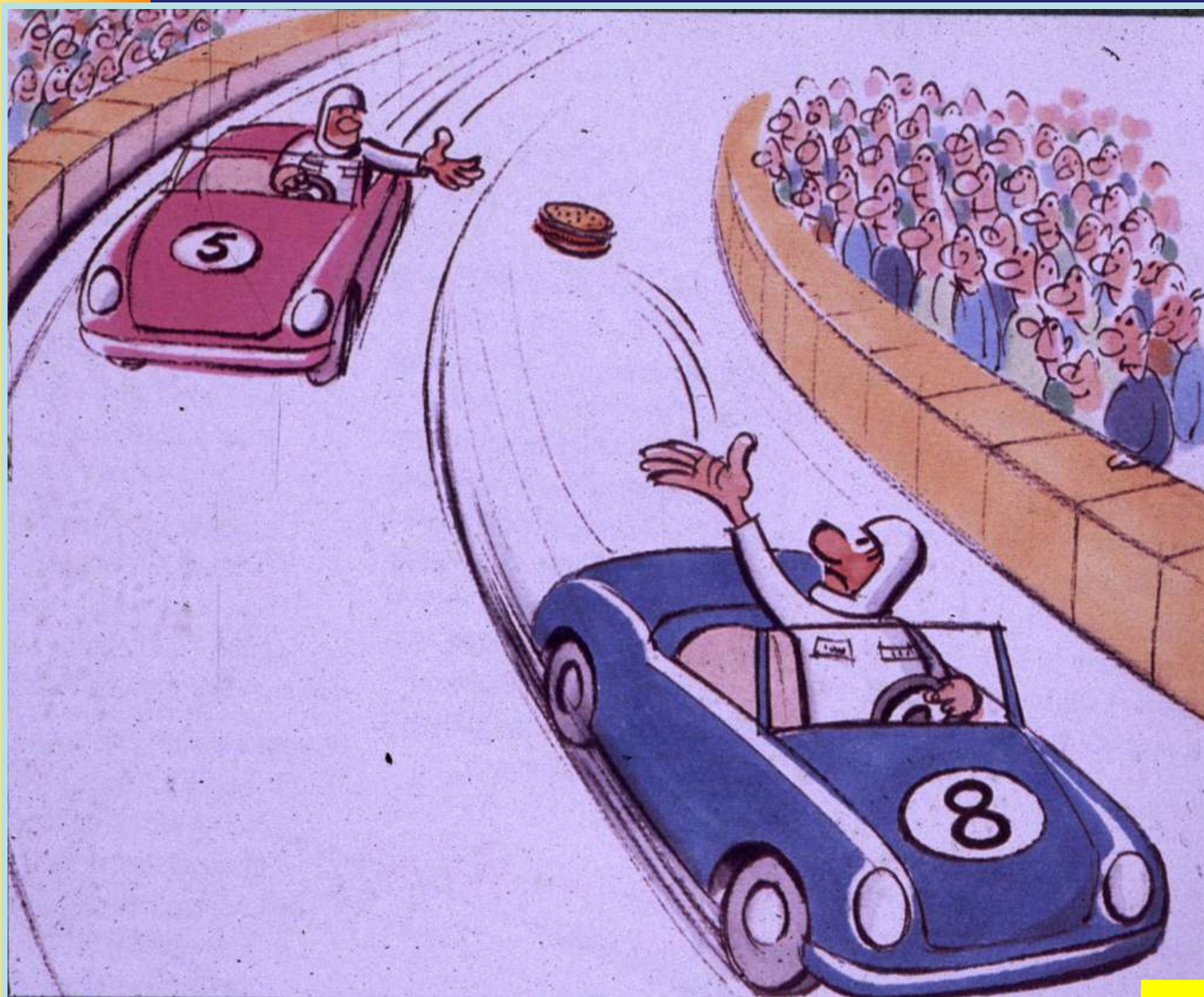
$$\omega_r = \omega_0 = \gamma \cdot B_0$$

$$E = h\nu_r = \Delta E$$

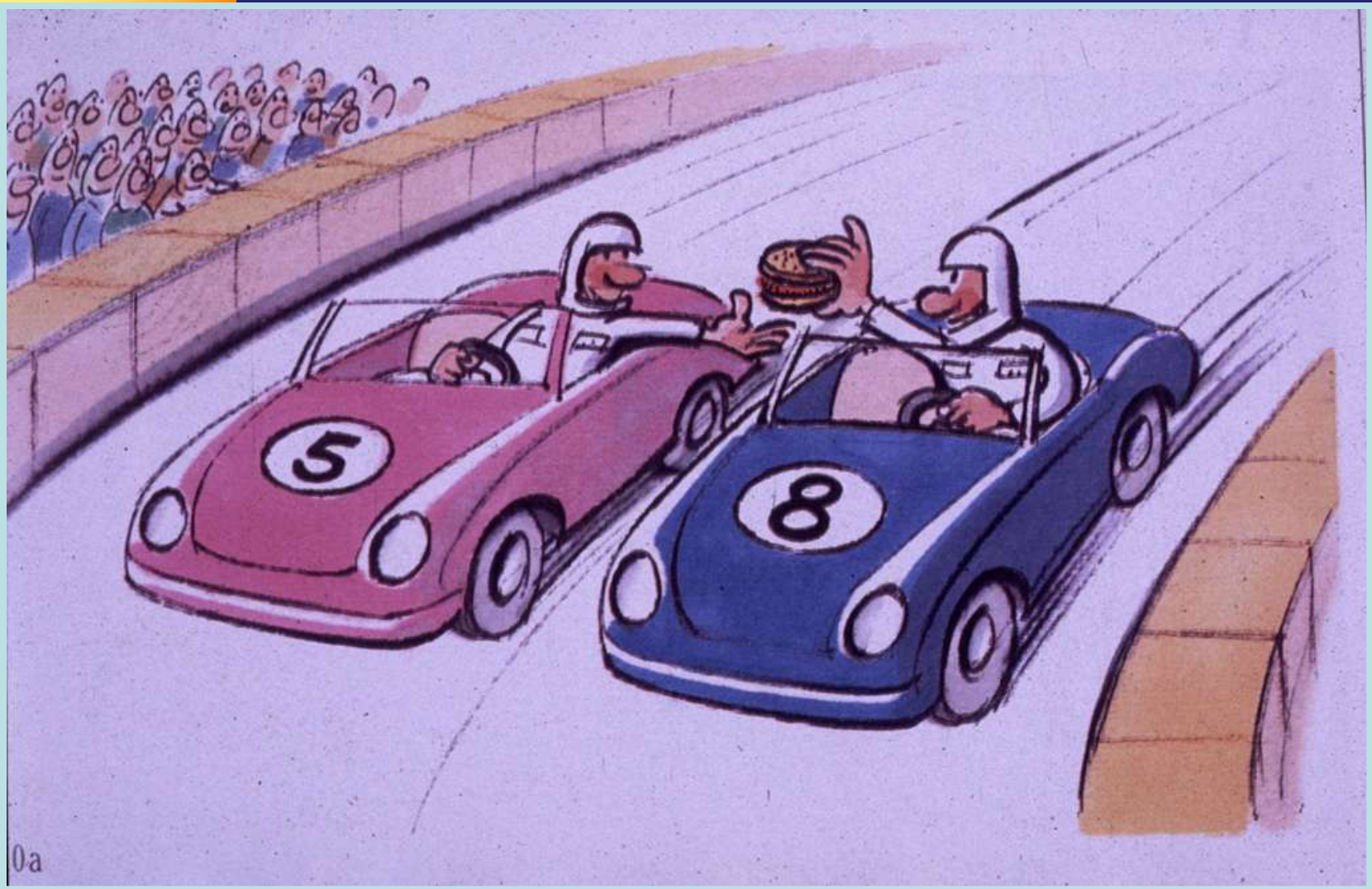


- Le 16 avril 1850, le Pont de Basse-Chaîne près d'Angers s'est rompu lors du passage d'un bataillon de soldats : les soldats marchant au pas cadencé ont mis le pont en résonance. 222 soldats se sont noyés
- Le pont de Tacoma (7 novembre 1940)





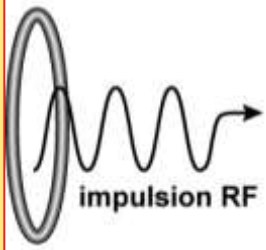
H. Schild



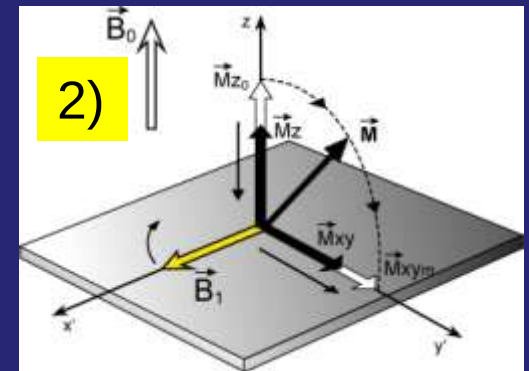
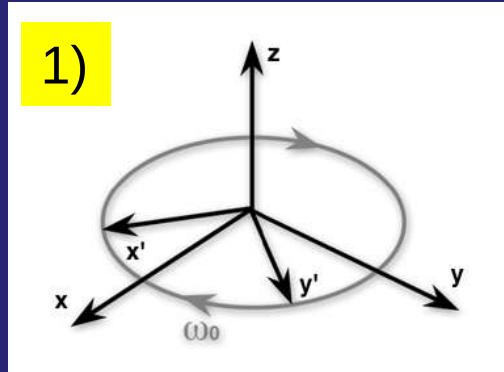
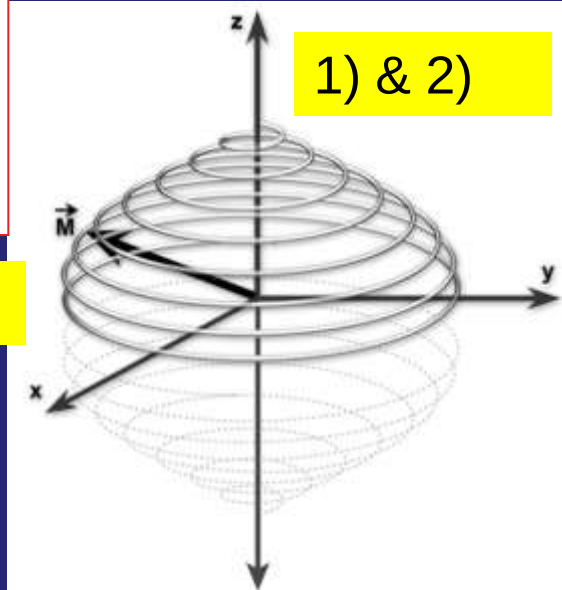
H. Schild

⇒ précession à la fois: 1) $\omega_0 = \gamma \cdot B_0$ et 2) $\omega_1 = \gamma \cdot B_1$

$$\omega_r = \omega_0$$



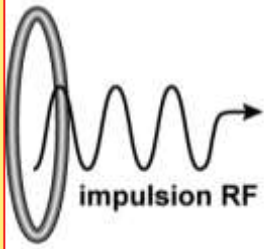
$$E = h\nu_r = \Delta E$$



Pour simplifier, on va se placer dans un référentiel tournant $x'Oy'$ à la fréquence angulaire ω_0

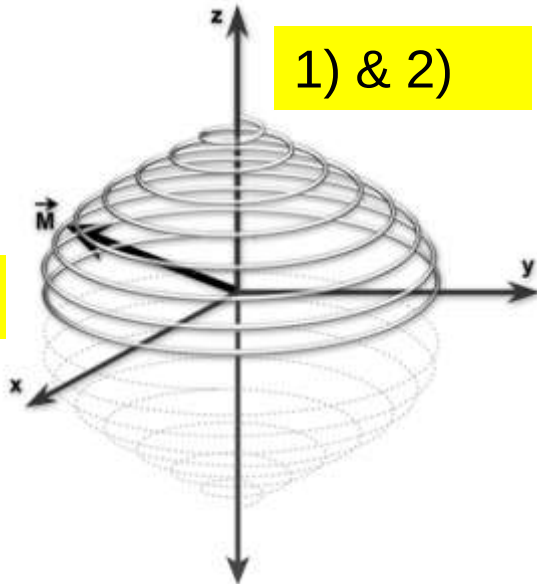
$\Rightarrow$ on ne verra que le mouvement de bascule de $\vec{M}$

$$\omega_r = \omega_0$$

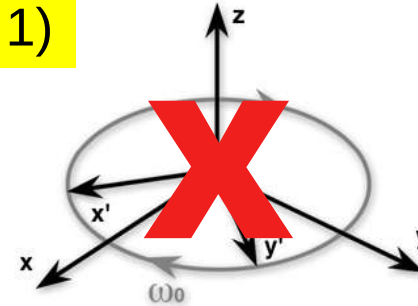


$$E = h\nu_r = \Delta E$$

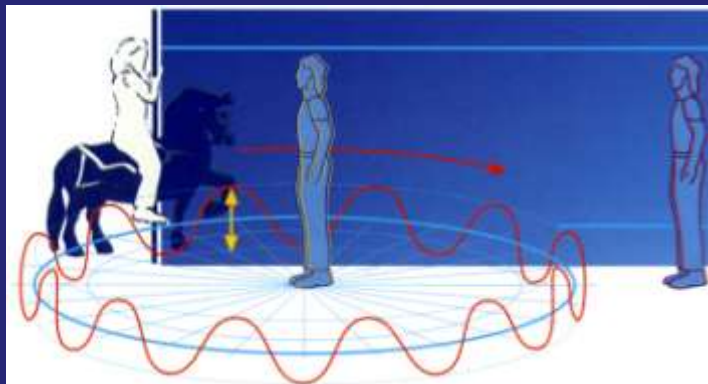
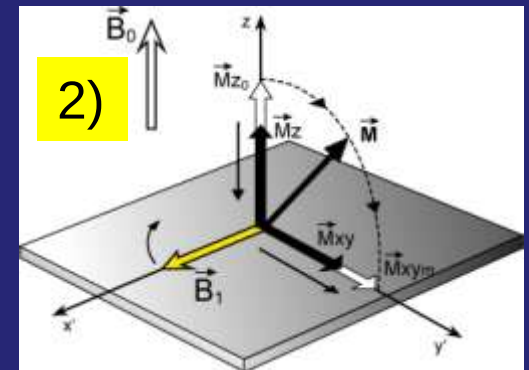
1) & 2)



1)

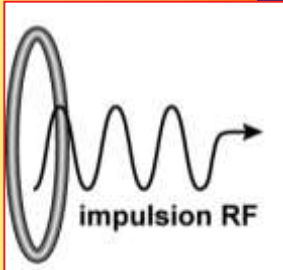


2)



Tournez manège !

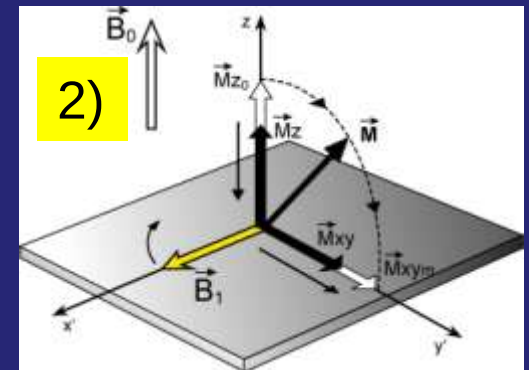
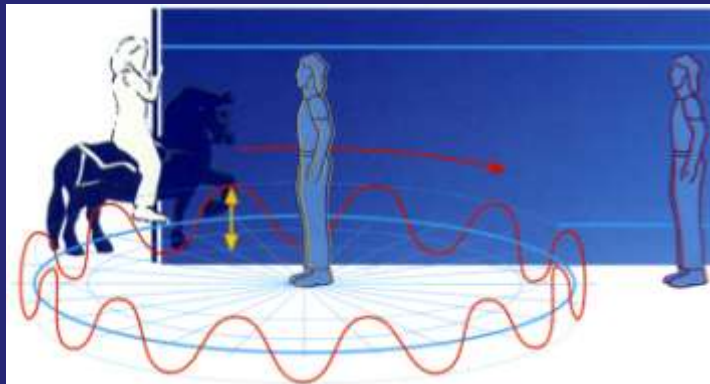
$$\omega_r = \omega_0$$



$$E = h\nu_r = \Delta E$$

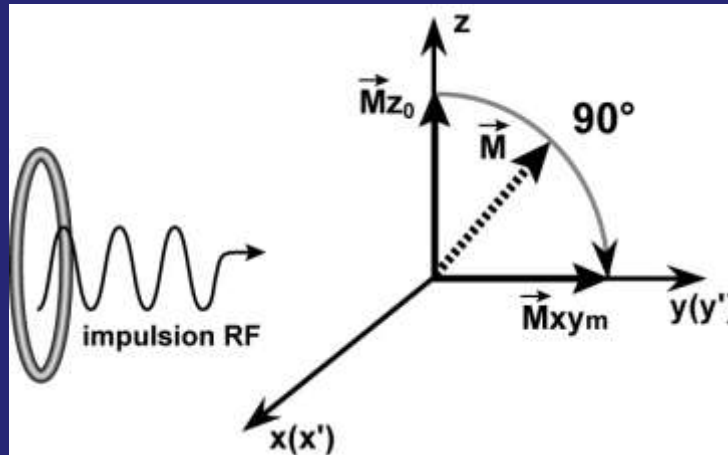
Pour simplifier, on va se placer dans un référentiel tournant $x'Oy'$ à la fréquence angulaire ω_0

$\Rightarrow$ on ne verra que le mouvement de bascule de $\vec{M}$ autour de B_1 : 2) $\omega_1 = \gamma \cdot B_1$

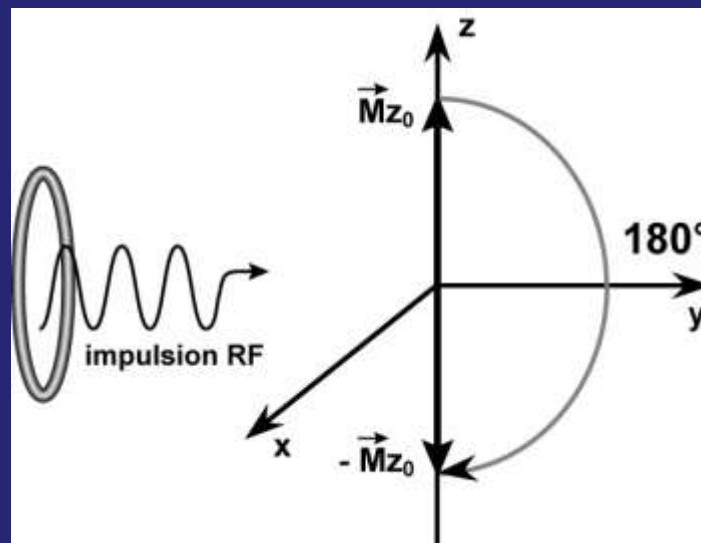


Tournez manège !

Une *impulsion RF de 90° ($\pi/2$)* bascule $\vec{M}$ dans le plan xOy



Une *impulsion RF de 180° (π)* inverse $\vec{M}z$



- Pour une « bascule » de 180° , il faut appliquer l'impulsion RF deux fois plus longtemps que pour une bascule de 90° .

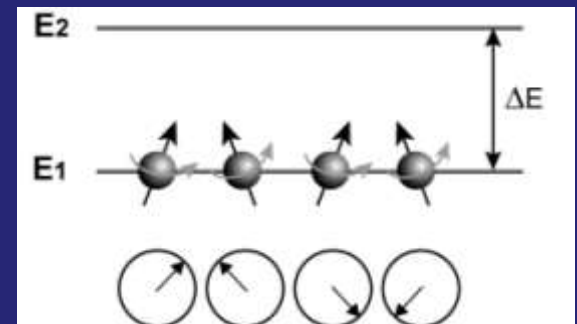
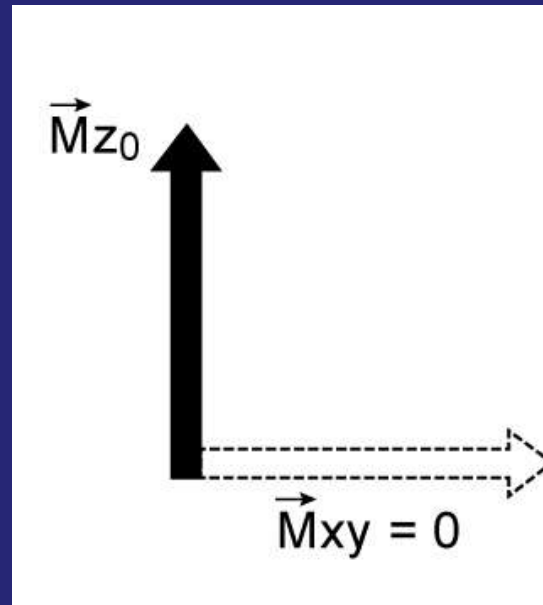
- Dans la pratique, on agit plutôt sur l'intensité de $\vec{B}_1$ que sur sa durée d'action.

A l'équilibre:

1) seulement une composante longitudinale M_z

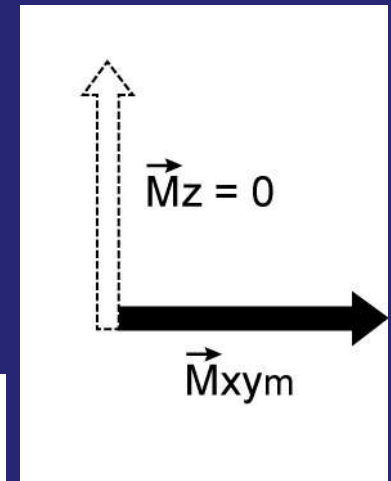
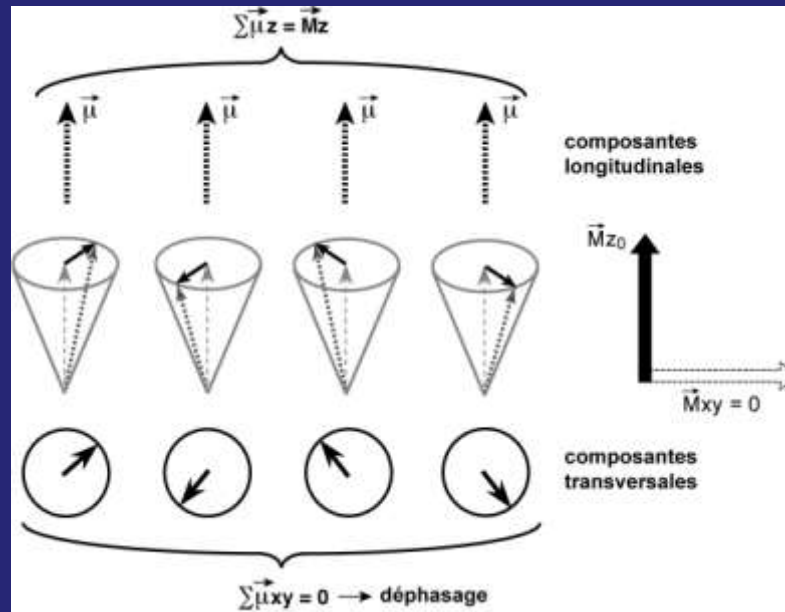
2) pas de composante transversale M_{xy}

(les protons sont déphasés les uns par rapport aux autres).



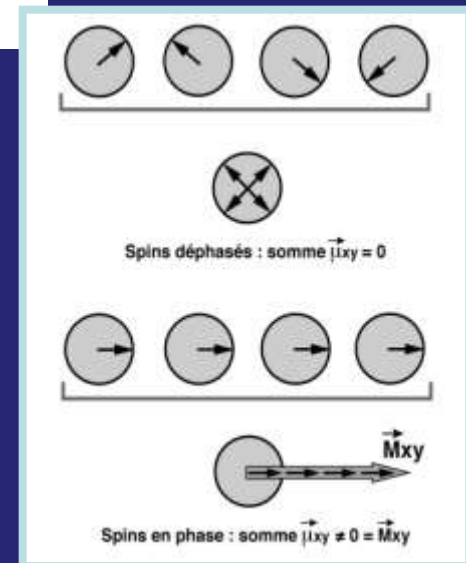
apparition de $\vec{M}_{xy}$?

Mise en phase des spins



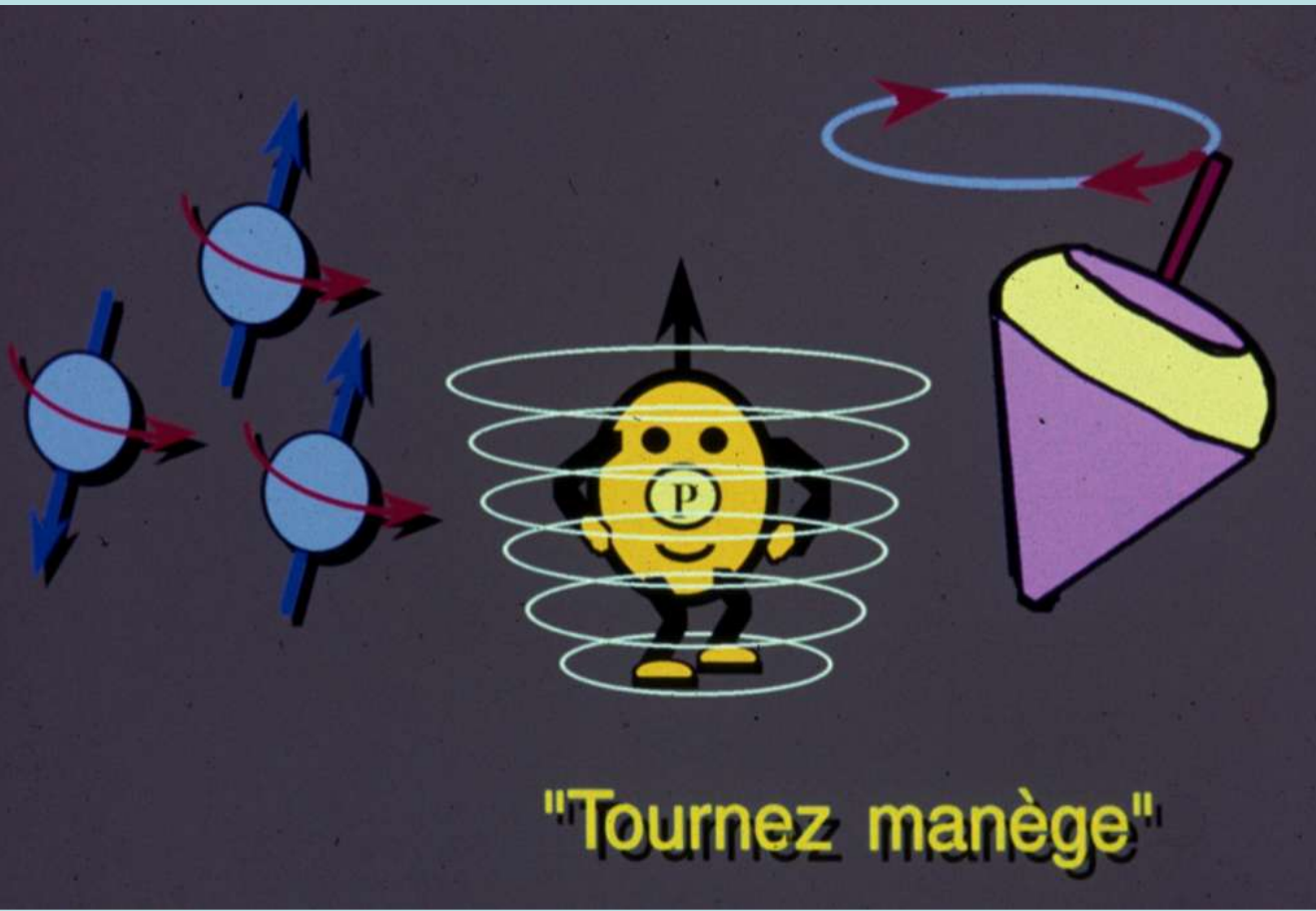
$\vec{B}_1$

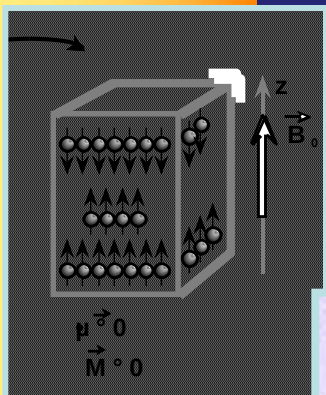
impulsion RF



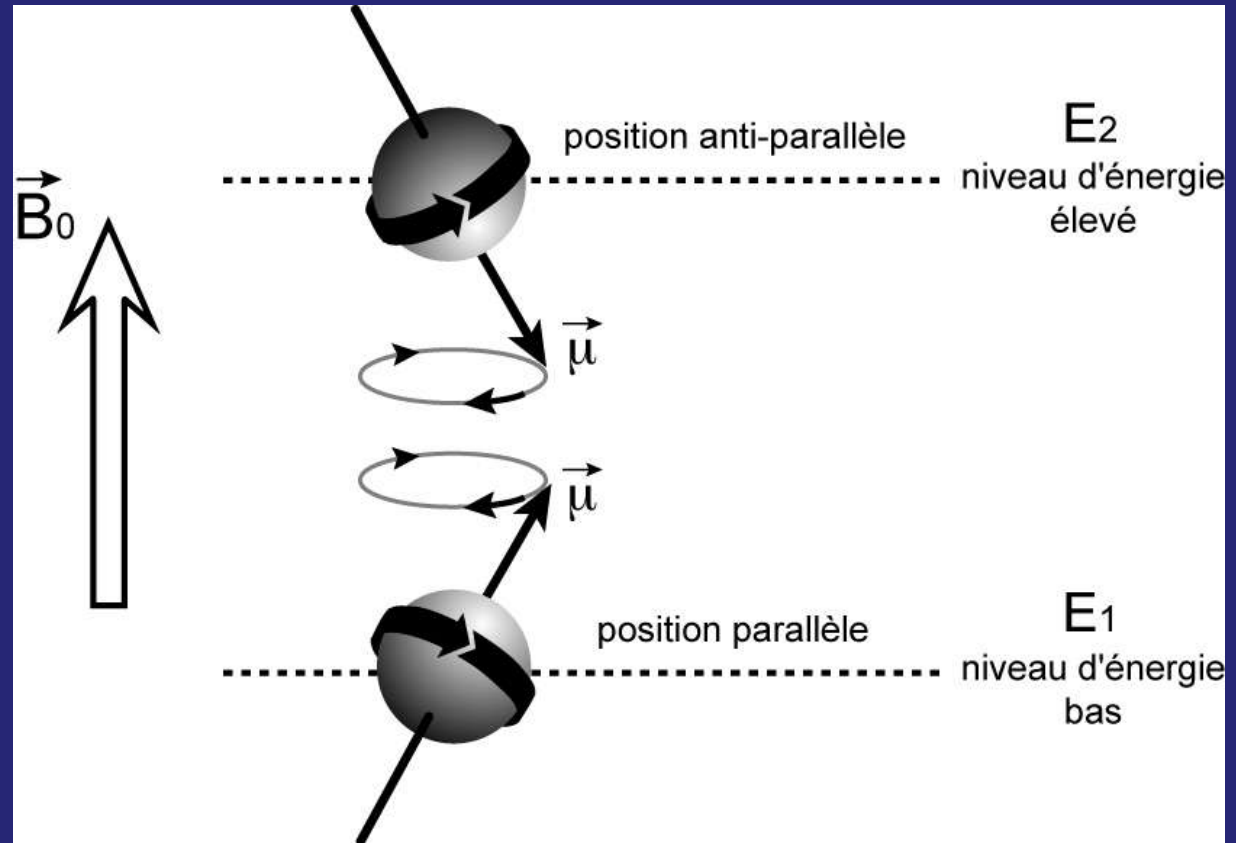
disparition de M_z ?

Energie !!!

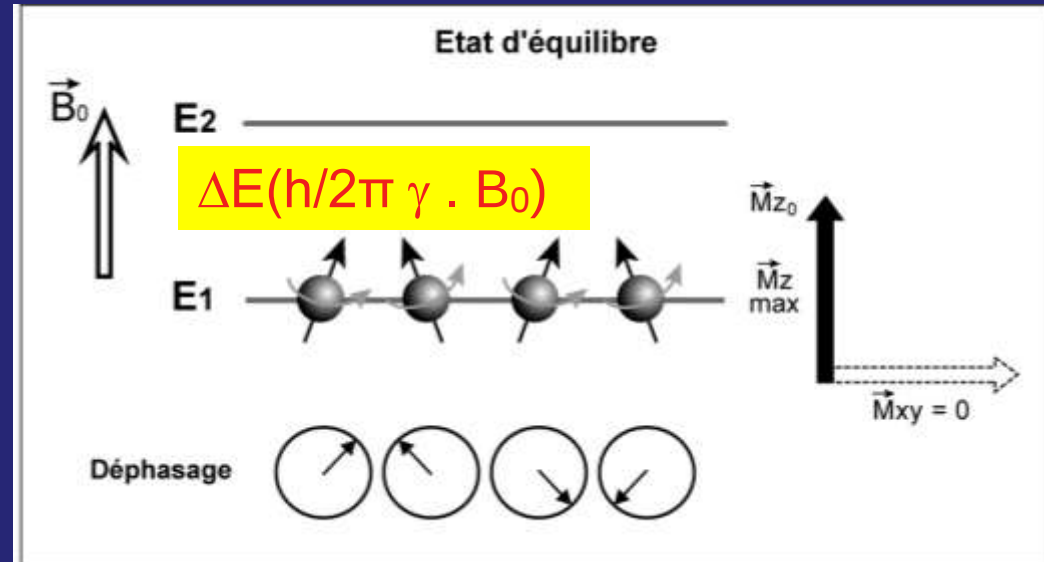




Mécanique quantique



Protons ne peuvent prendre que 2 orientations :
Correspondant à 2 niveaux d'énergie différents



Fréquence de précession
(fréquence de LARMOR) :

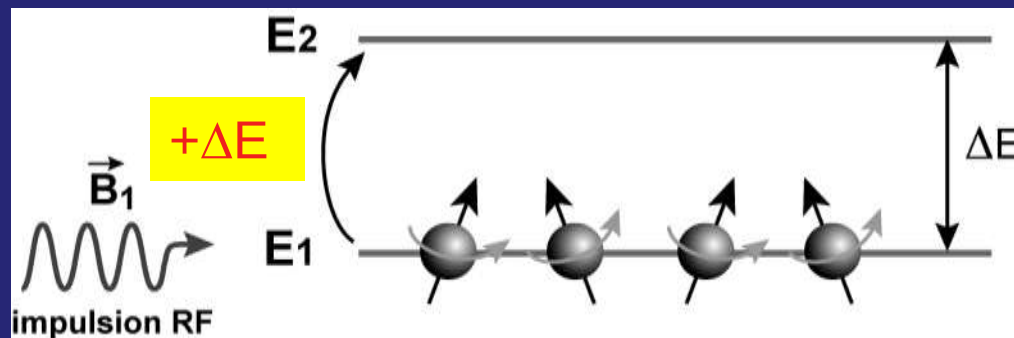
$$\omega_0 = \gamma \cdot B_0$$

Quelles sont les conséquences de l'application de l'onde RF B1 , à la fréquence de résonance ?

$$\omega_r = \omega_0 = \gamma \cdot B_0$$

L'onde RF permet de fournir la quantité d'énergie exactement égale à ΔE , ce qui permet d'induire des transitions du niveau E1 à E2.

$$E = h\nu_r = \Delta E$$



Un peu d'histoire

Le magnétisme
nucléaire

Action d'un champ
magnétique

Le phénomène de
résonance
magnétique

La relaxation

Le signal

Onde B1 à la bonne fréquence $\omega_r = \omega_0$ (résonance)

=

B1 apporte la bonne quantité d'énergie $E = h\nu_r = \Delta E$

$$\omega_r = \omega_0 = \gamma \cdot B_0$$

=

$$E = h\nu_r = \Delta E$$

Si B1 apporte la bonne quantité d'énergie $E(B1) = \Delta E$

$$E = h\nu_r \text{ et } \Delta E = h/2\pi \gamma \cdot B_0,$$

$$h\nu_r = h/2\pi \gamma \cdot B_0,$$

$$h2\pi\nu_r = h \gamma \cdot B_0,$$

$$2\pi\nu_r = \gamma \cdot B_0,$$

$$2\pi\nu_r = \omega_r \text{ et } \gamma \cdot B_0 = \omega_0$$

$$\omega_r = \omega_0$$

Alors B1 à la bonne fréquence $\omega_r = \omega_0$

$$\omega_r = \omega_0 = \gamma \cdot B_0$$



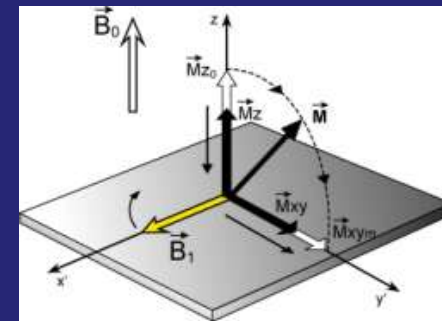
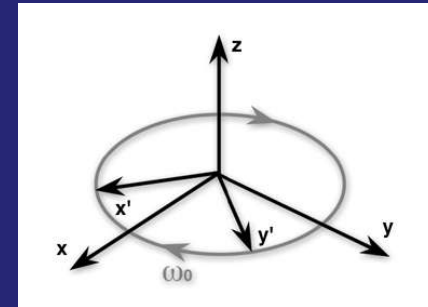
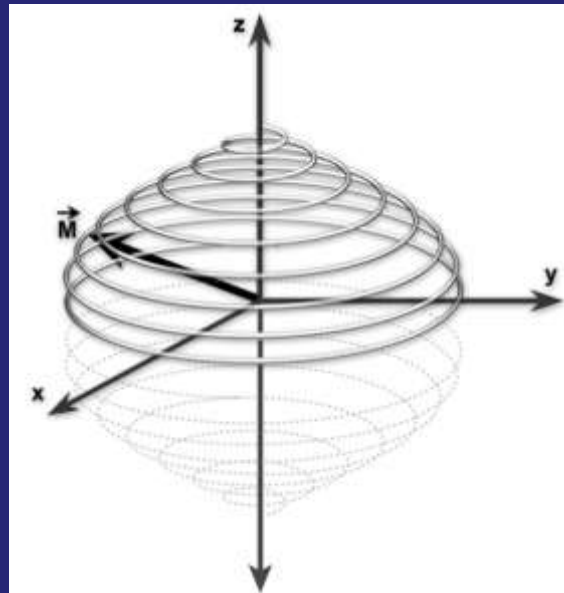
$$E = h\nu_r = \Delta E$$

$$\omega_r = \omega_0 = \gamma \cdot B_0$$

Ou

$$E = h\nu_r = \Delta E$$

⇒ précession à la fois: 1) $\omega_0 = \gamma \cdot B_0$ et 2) $\omega_1 = \gamma \cdot B_1$



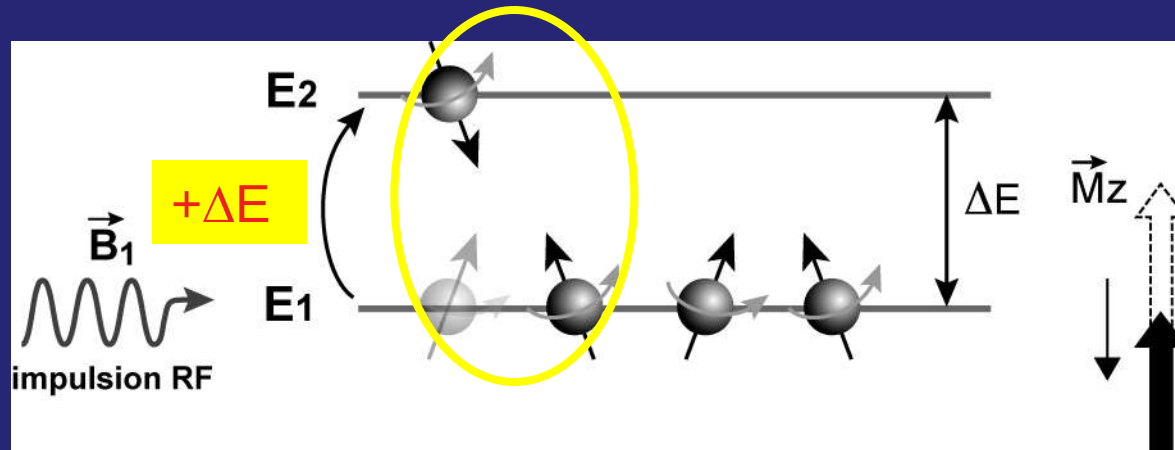
$$\omega_r = \omega_0 = \gamma \cdot B_0$$

Ou

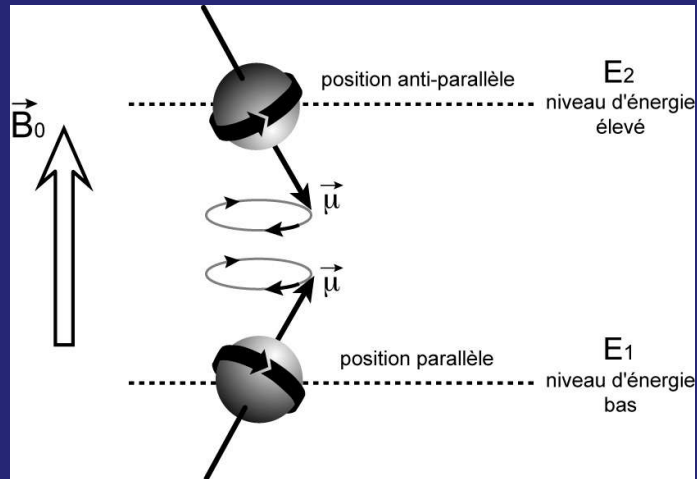
$$E = h\nu_r = \Delta E$$

« doper » protons E1 en $+\Delta E$

permet d'induire des transitions du niveau E1 à E2.

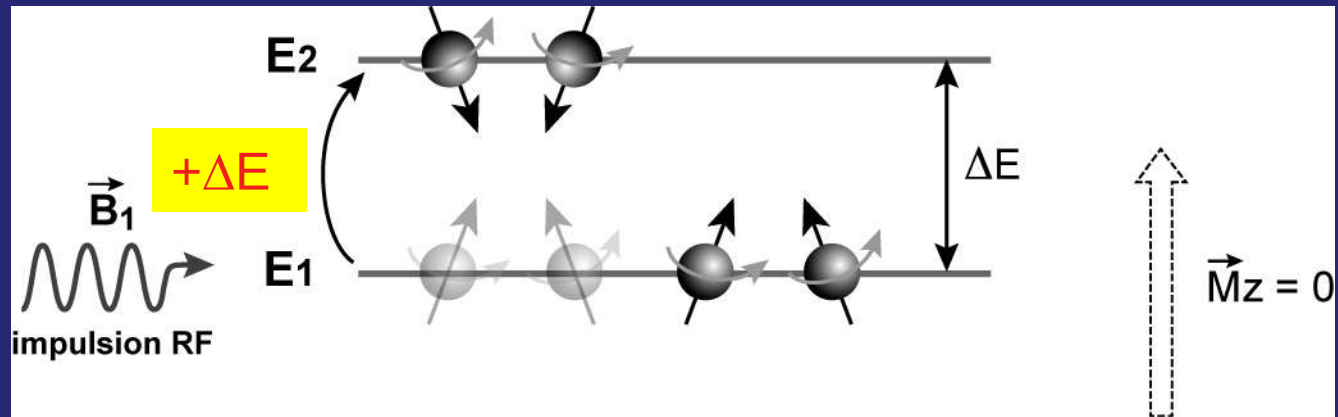


Et sur nos protons?

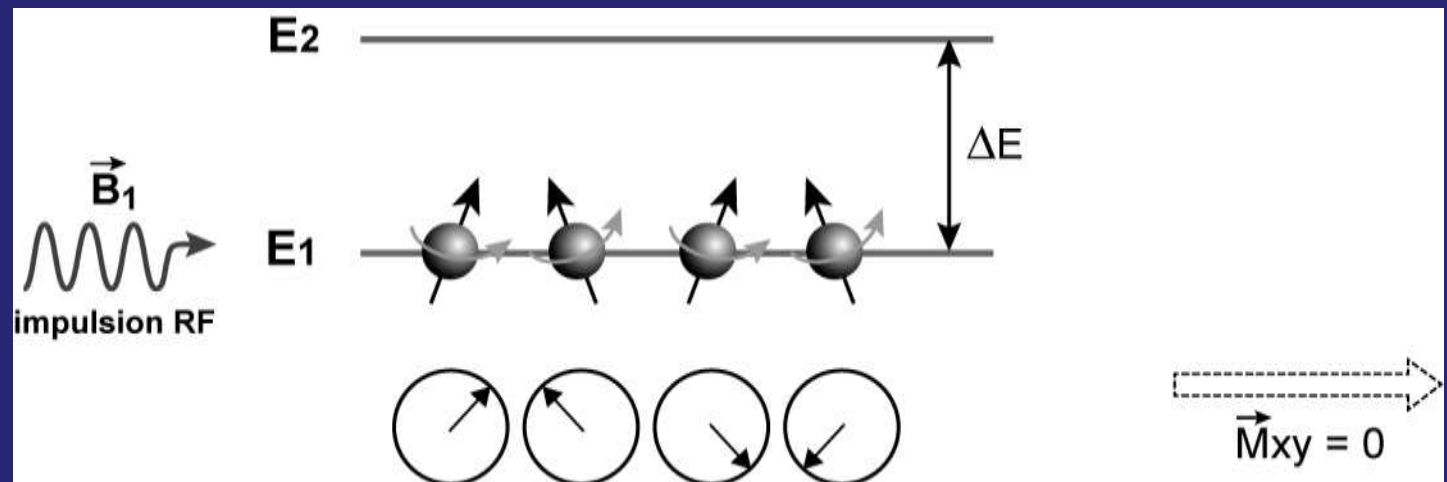


ne peuvent prendre que 2 orientations :
2 niveaux d'énergie différents

⇒ égalisation des populations de protons sur les 2 niveaux d'énergie E_1 et E_2 : M_z s'annule.

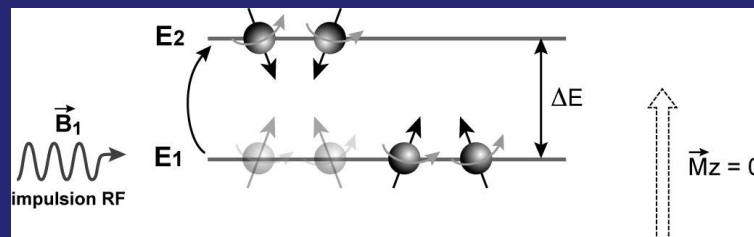
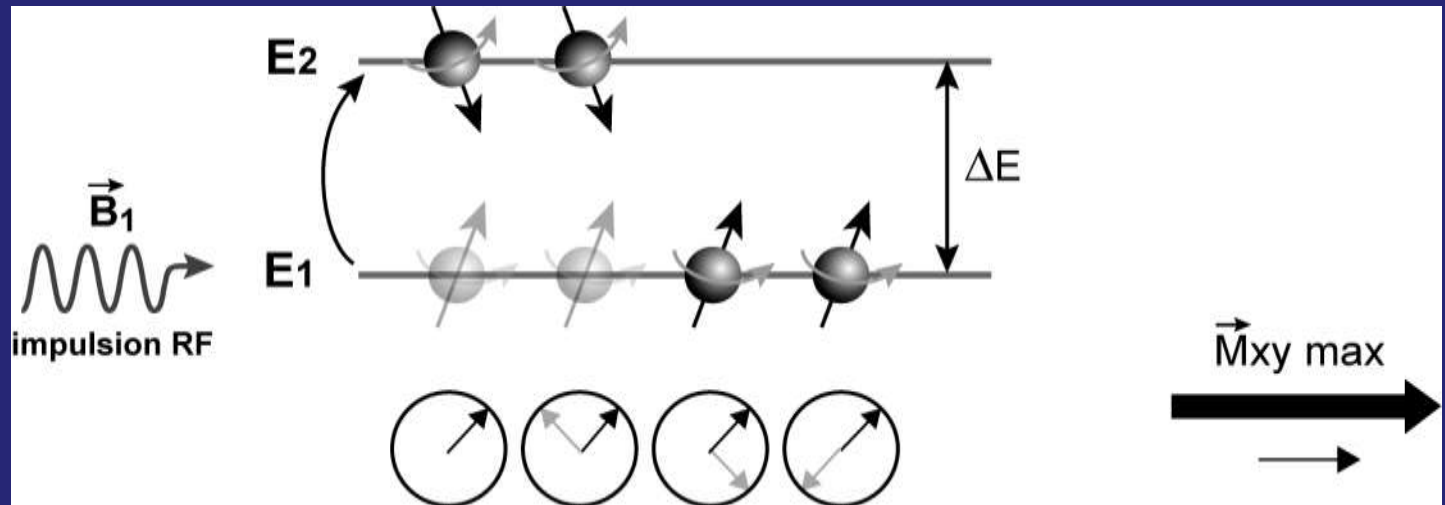


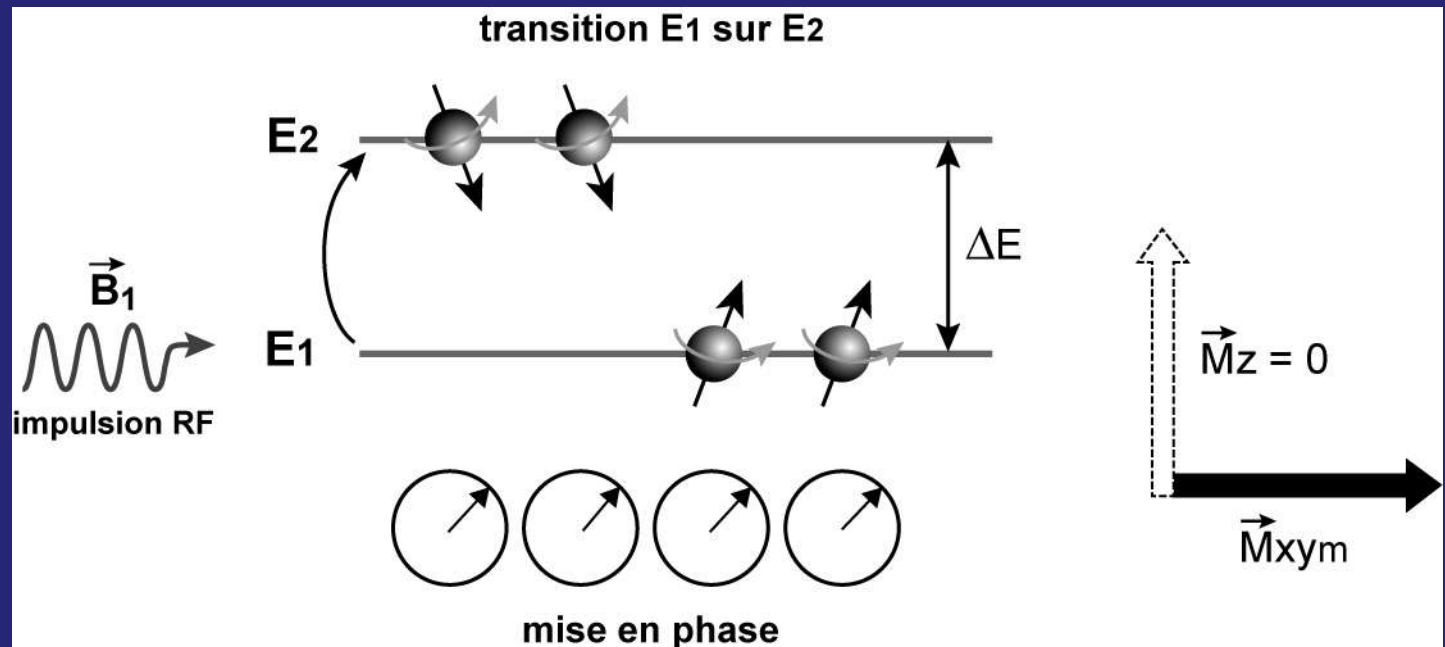
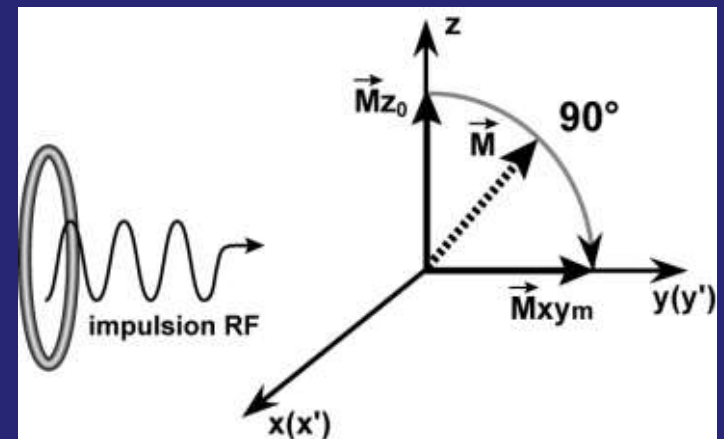
2) A l'équilibre les protons sont déphasés les uns par rapport aux autres.



3) En même temps que les protons changent de niveau d'énergie, ils se mettent en phase les uns par rapport aux autres.

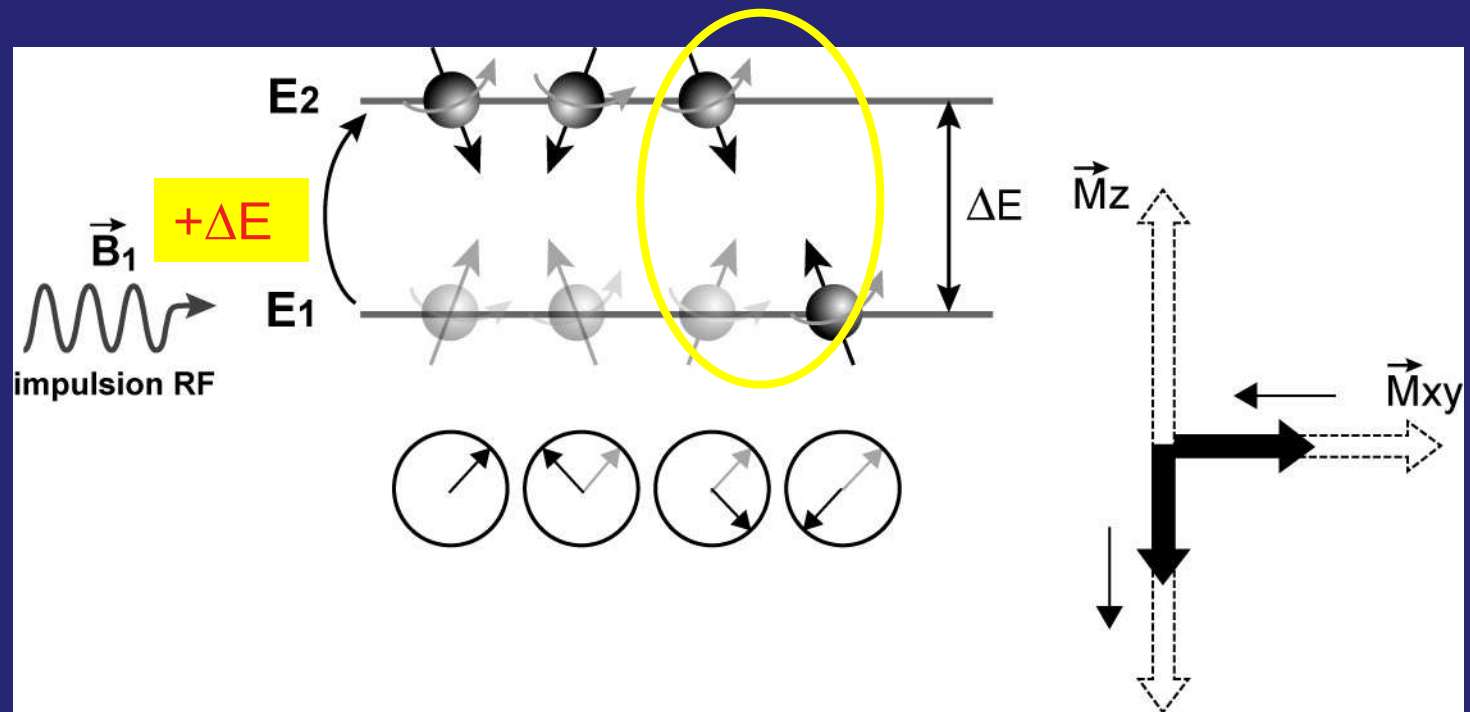
⇒ ce rephasage des spins fait apparaître la composante transversale $\vec{M}_{xy}$ de l'aimantation.

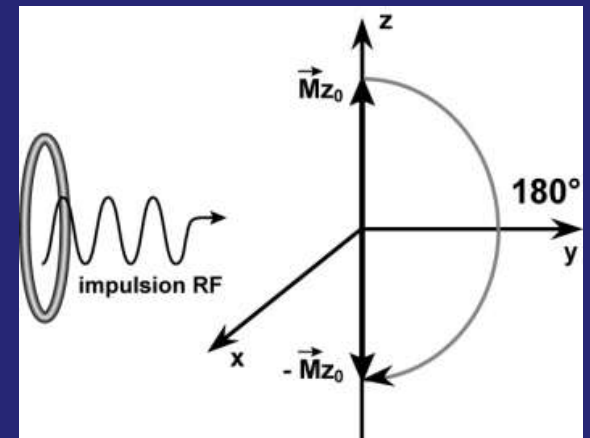




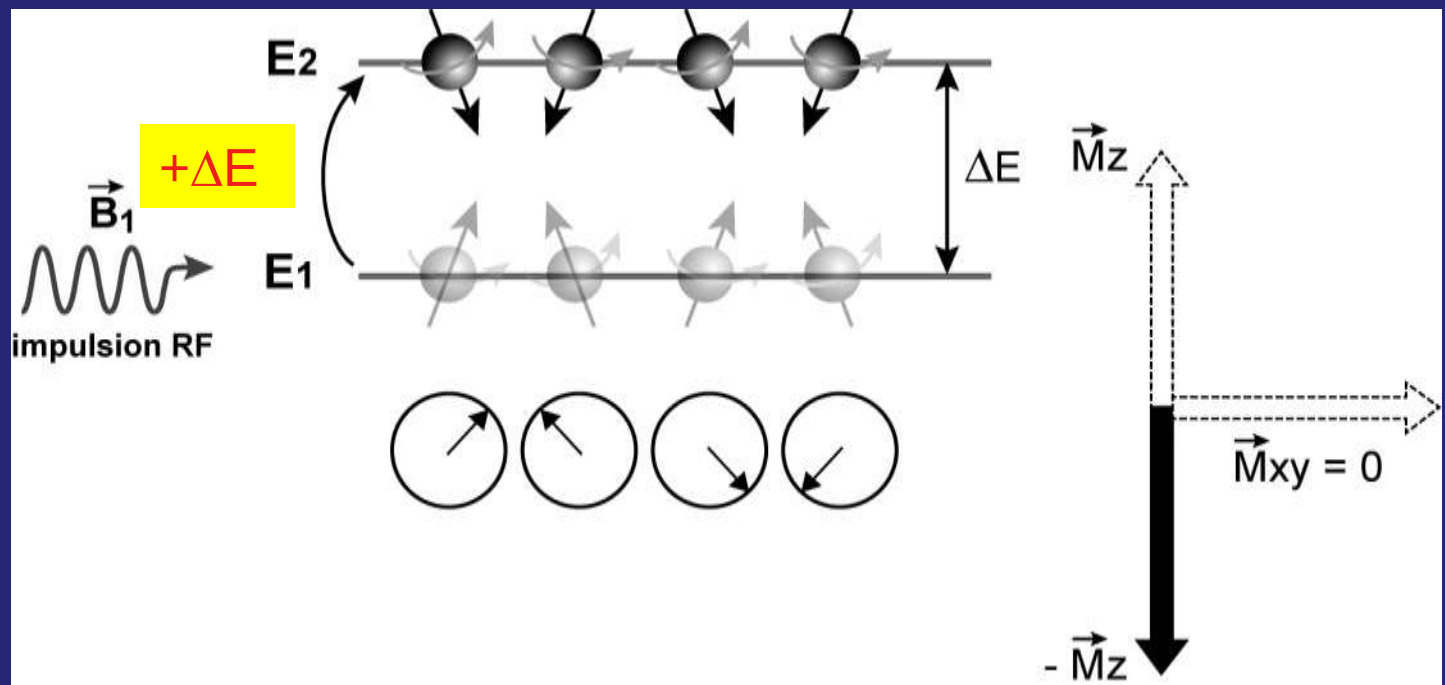
$\vec{M}_{xy}$ devient maximal (rephasage) en même temps que M_z s'annule (égalisation).

Si l'on continue à appliquer l'onde RF on obtient une **inversion** progressive de $\vec{M}_z$





Pour obtenir finalement une **inversion complète** ($M = -M_z$)



(les spins se déphasent à nouveau $M_{xy} = 0$)

Un peu d'histoire

Le magnétisme
nucléaire

Action d'un champ
magnétique

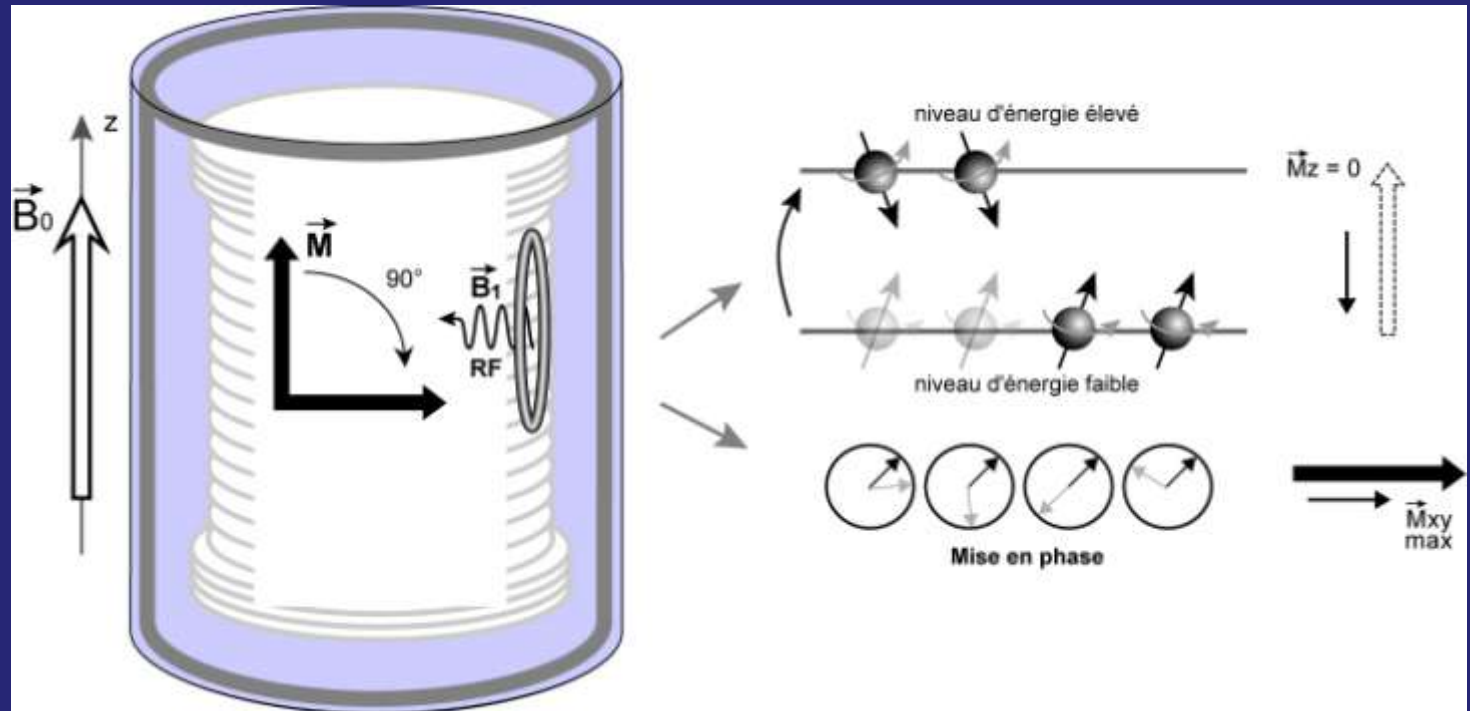
Le phénomène de
résonance
magnétique

La relaxation

Le signal

Le contraste en T1,
T2 et densité
protonique

En résumé



$$E = h\nu_r = \Delta E$$

$$\omega_r = \omega_0 = \gamma \cdot B_0$$

C'est la *phase d'excitation*
bascule à 90° (égalisation)

En résumé

Un peu d'histoire

Le magnétisme nucléaire

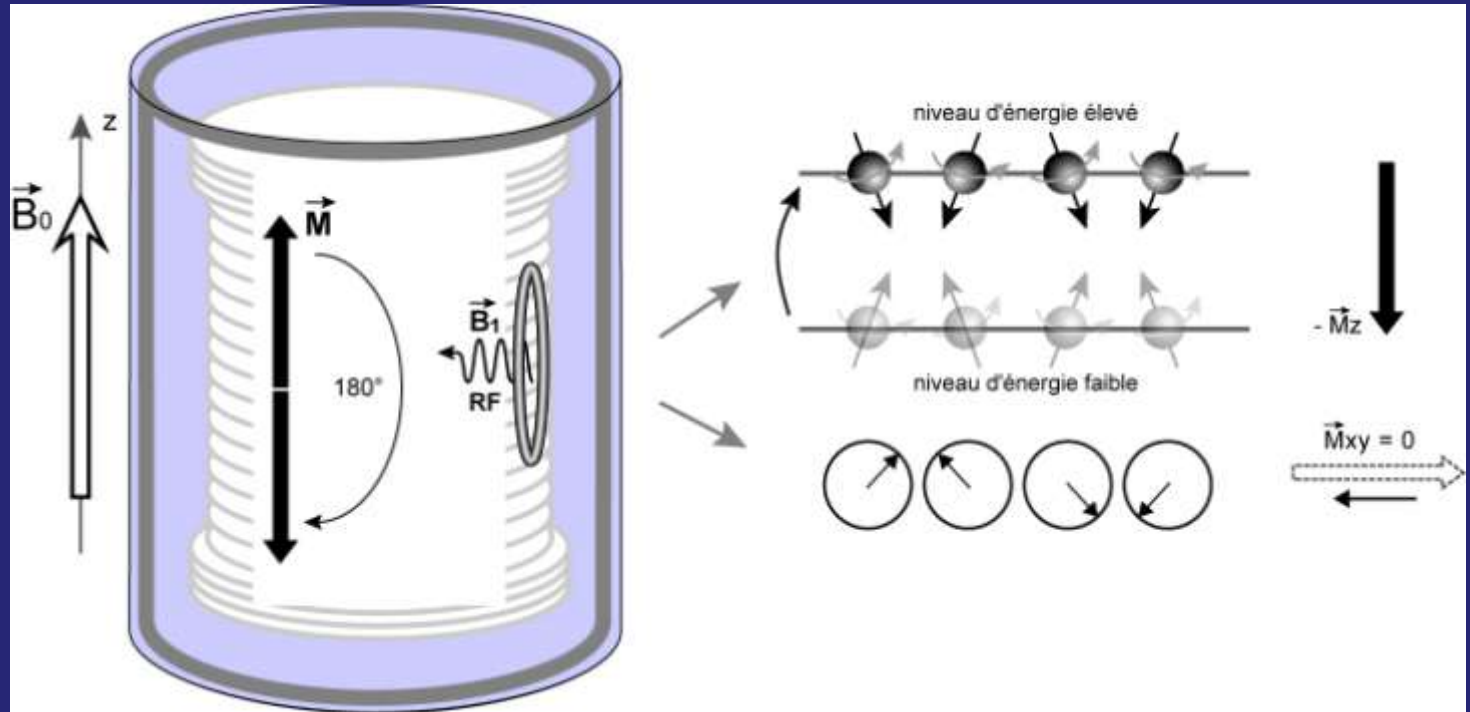
Action d'un champ magnétique

Le phénomène de résonance magnétique

La relaxation

Le signal

Le contraste en T1, T2 et densité protonique



C'est la *phase d'excitation*
bascule 180°

Un peu d'histoire

Le magnétisme
nucléaire

Action d'un champ
magnétique

Le phénomène de
résonance
magnétique

La relaxation

Le signal

Principe de l'écho
de spin

Le contraste en T1,
T2 et densité
protonique



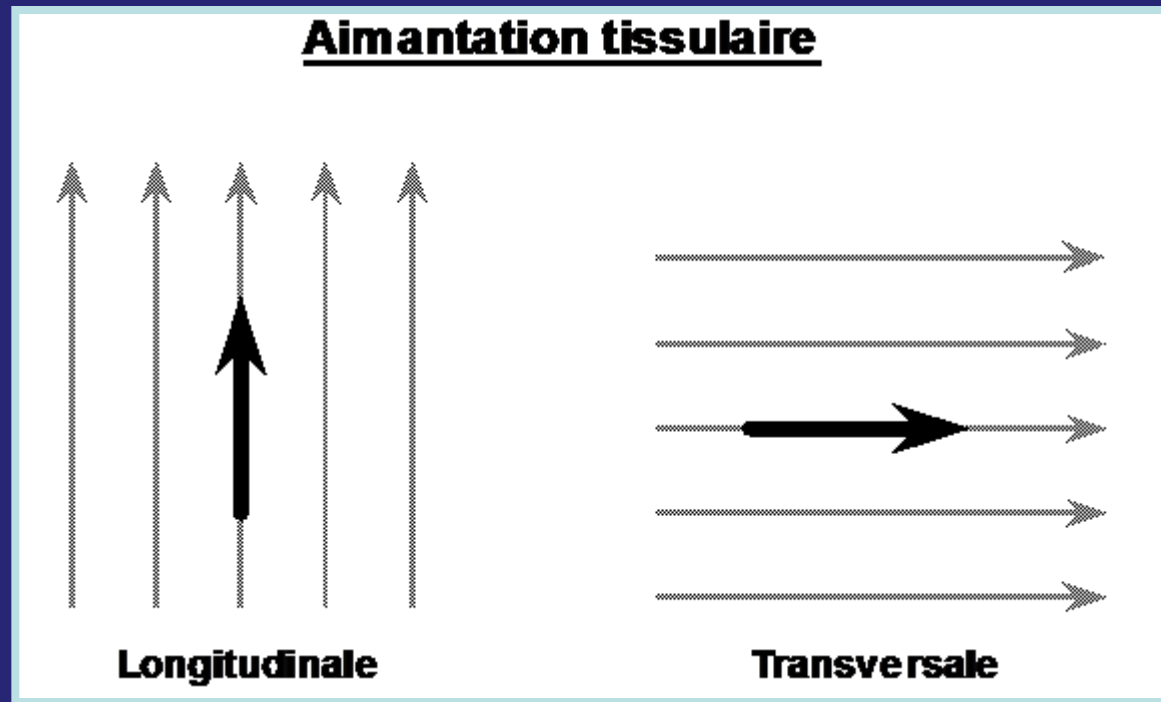


"Un week-end à la campagne"

AIMANTATION TISSULAIRE

Deux types

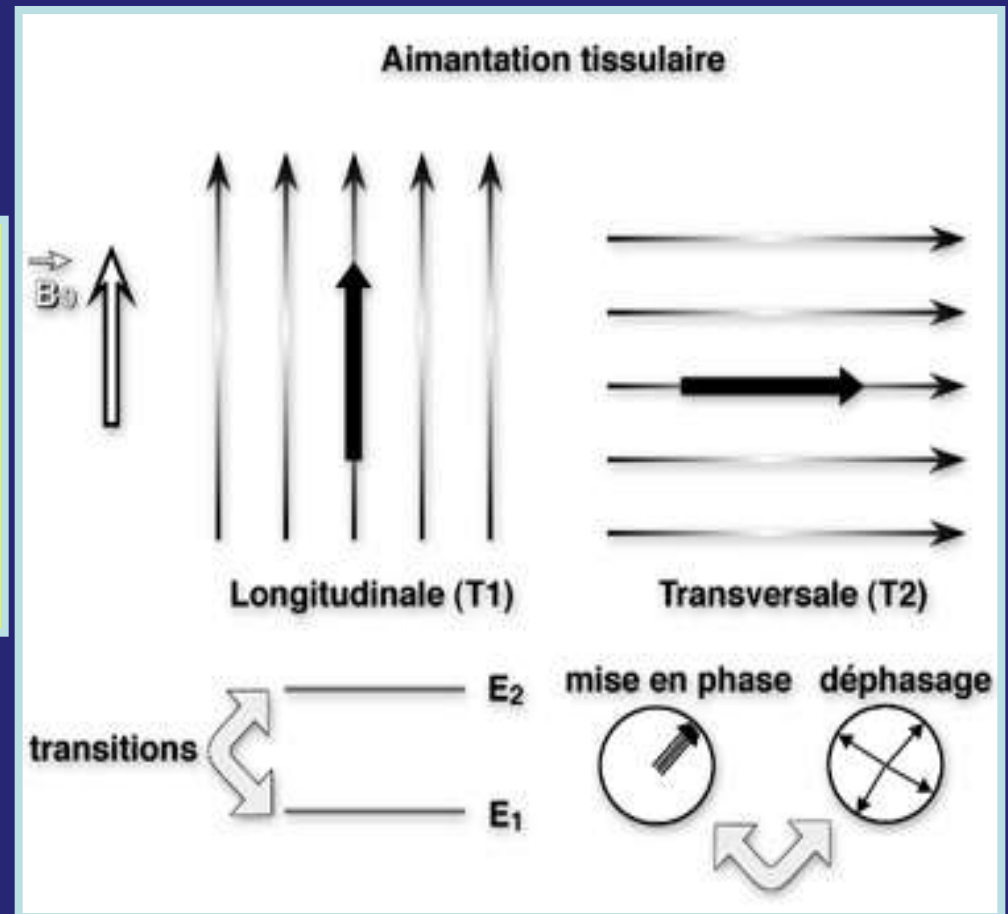
- Longitudinal
- Transversal



AIMANTATION TISSULAIRE

Deux types

- Longitudinal (T1)
- Transversal (T2)



Un peu d'histoire

Le magnétisme
nucléaire

Action d'un champ
magnétique

Le phénomène de
résonance
magnétique

La relaxation

Le signal

Principe de l'écho
de spin

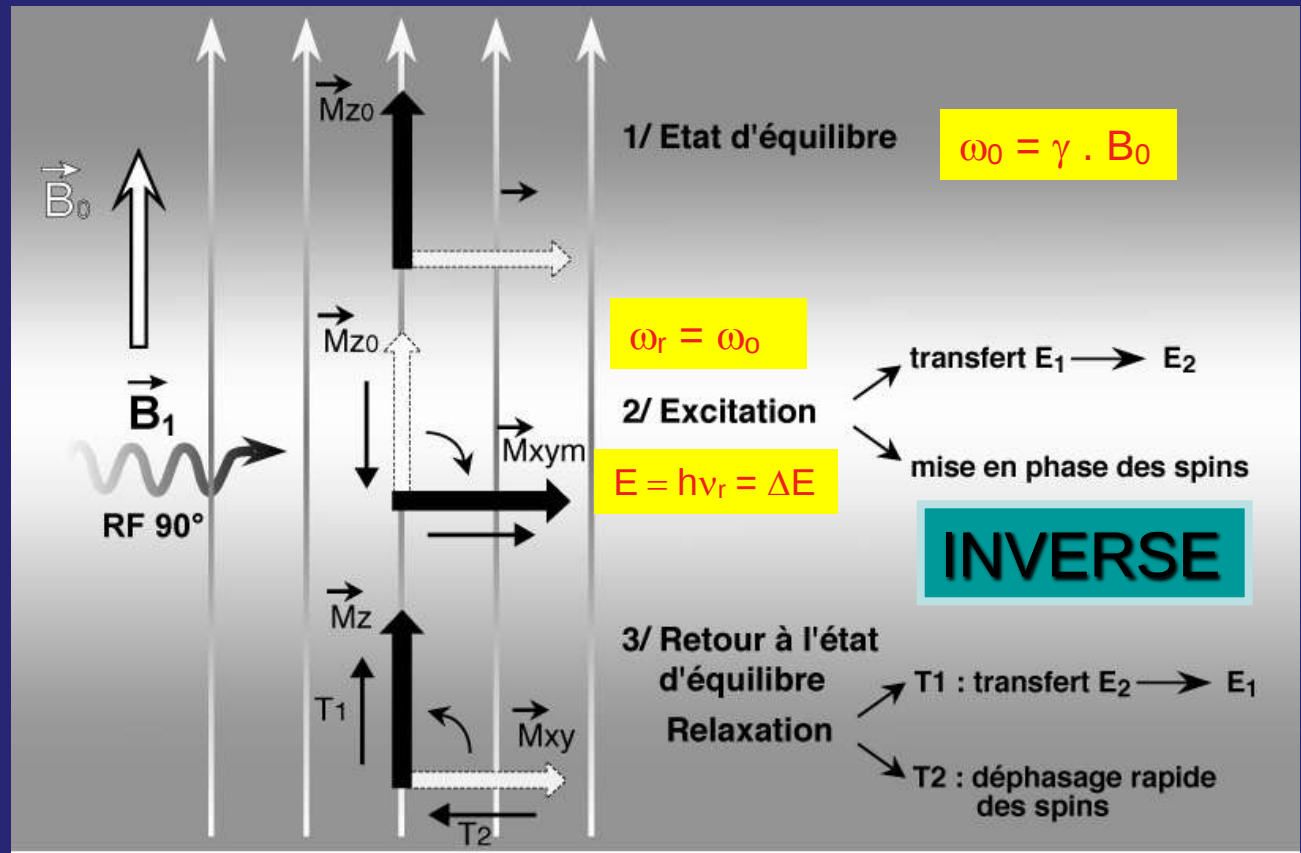
Le contraste en T1,
T2 et densité
protonique

La relaxation

L'état d'**excitation** est instable.

Dès sa fin, il y a retour à l'état d'équilibre (stable) :

⇒ les **phénomènes inverses** vont avoir lieu.



Un peu d'histoire

Le magnétisme
nucléaire

Action d'un champ
magnétique

Le phénomène de
résonance
magnétique

La relaxation

- T1 - T2

Le signal

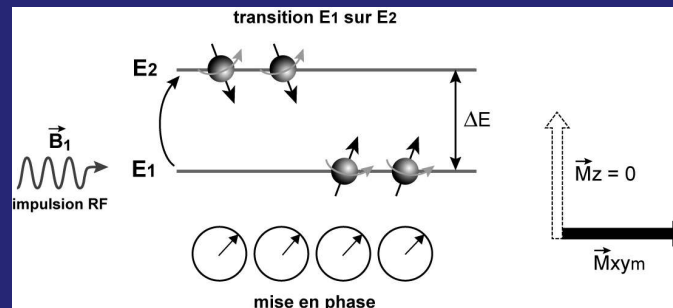
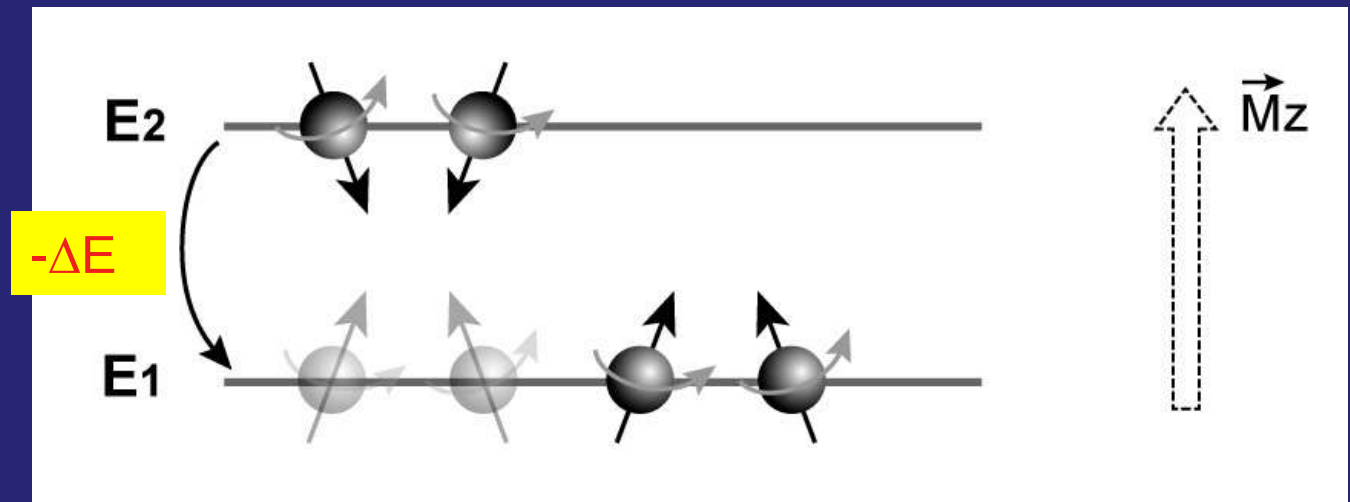
Principe de l'écho
de spin

Le contraste en T1,
T2 et densité
protonique

Mise en place des
événements d'une
séquence

« perte » protons E2 de $-\Delta E$

Transitions inverses de E2 sur E1 des protons
(antiparallèle vers parallèle), ce qui entraîne la
repousse de Mz (ici après une impulsion de 90°)



Un peu d'histoire

Le magnétisme
nucléaire

Action d'un champ
magnétique

Le phénomène de
résonance
magnétique

La relaxation

- T1 - T2

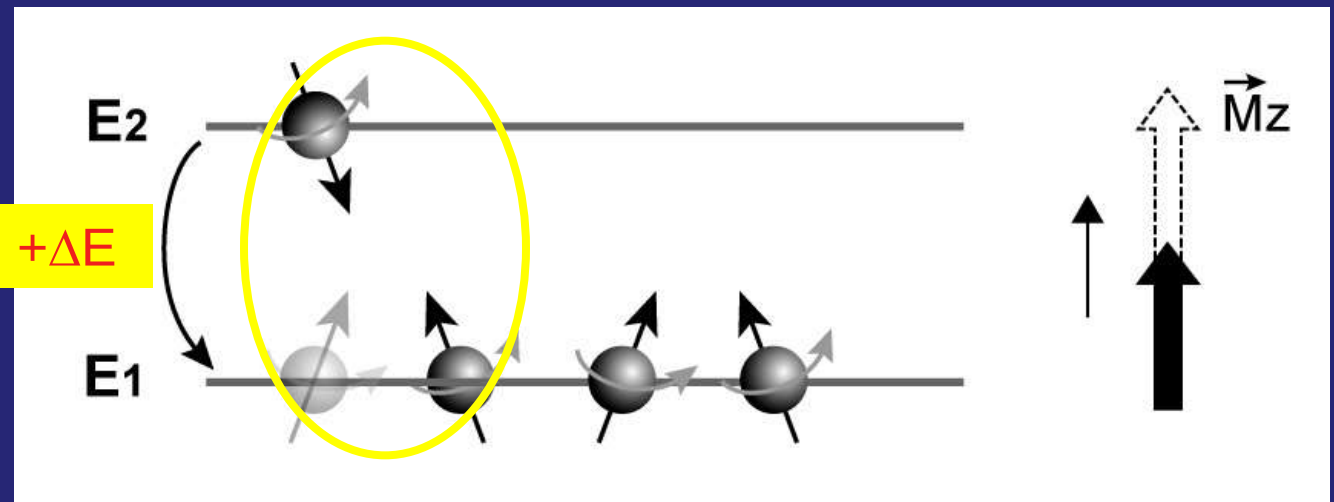
Le signal

Principe de l'écho
de spin

Le contraste en T1,
T2 et densité
protonique

Mise en place des
événements d'une
séquence

1. Transitions inverses de E2 sur E1 des protons
(antiparallèle vers parallèle), ce qui entraîne la
repousse de $\vec{M}_z$



Un peu d'histoire

Le magnétisme
nucléaire

Action d'un champ
magnétique

Le phénomène de
résonance
magnétique

La relaxation

- T1 - T2

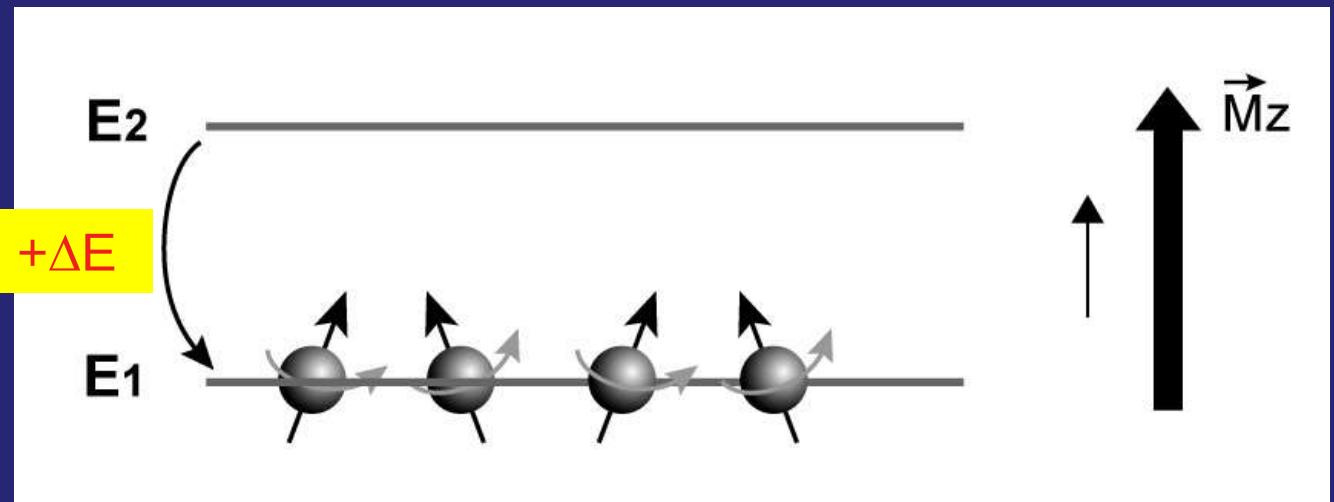
Le signal

Principe de l'écho
de spin

Le contraste en T1,
T2 et densité
protonique

Mise en place des
événements d'une
séquence

1. Transitions inverses de E2 sur E1 des protons (antiparallèle vers parallèle), ce qui entraîne la repousse de $\vec{M}_z$



C'est la *relaxation longitudinale T1*

Un peu d'histoire

Le magnétisme nucléaire

Action d'un champ magnétique

Le phénomène de résonance magnétique

La relaxation

- T_1 - T_2

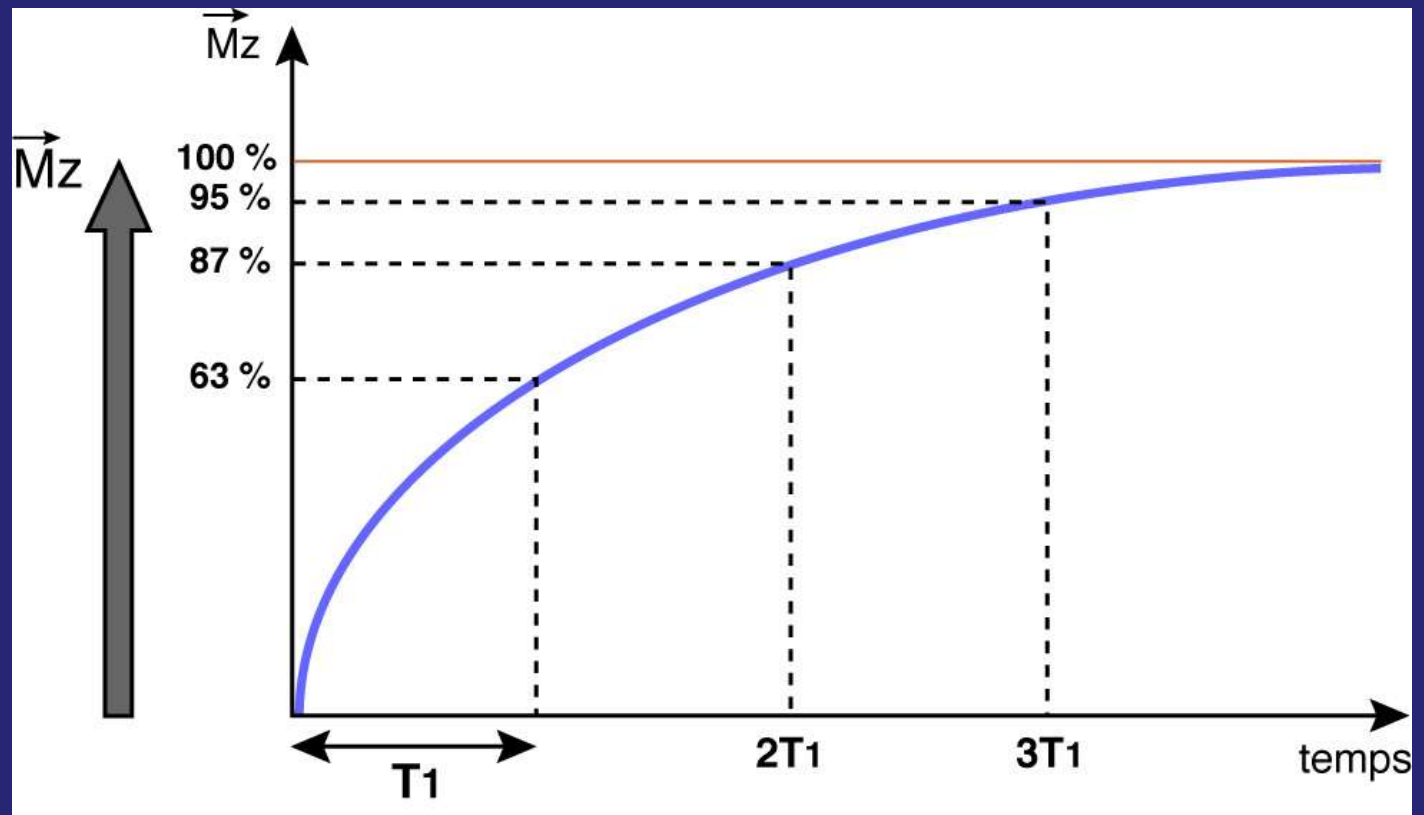
Le signal

Principe de l'écho de spin

Le contraste en T_1 , T_2 et densité protonique

Mise en place des événements d'une séquence

T_1 est un temps (en ms) correspondant à la repousse de $\vec{M}_z \Rightarrow$ c'est le temps mis par $\vec{M}_z$ pour atteindre 63% de sa valeur initiale.



C'est une *exponentielle croissante* :

$$M_z(t) = M_0 (1 - e^{-t/T_1})$$

Un peu d'histoire

Le magnétisme nucléaire

Action d'un champ magnétique

Le phénomène de résonance magnétique

La relaxation

- T1 - T2

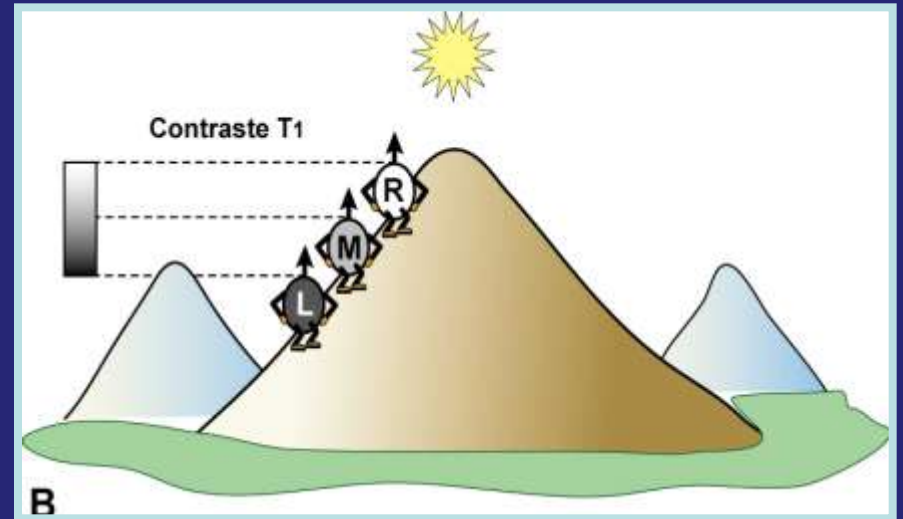
Le signal

Principe de l'écho de spin

Le contraste en T1, T2 et densité protonique

Mise en place des événements d'une séquence

→
Repousse de $\vec{M}_z$ (T1-63%) $\Rightarrow$ pas instantanée



C'est une *exponentielle croissante* :

$$M_z(t) = M_0 (1 - e^{-t/T_1})$$

Un peu d'histoire

Le magnétisme
nucléaire

Action d'un champ
magnétique

Le phénomène de
résonance
magnétique

La relaxation

- T1 - T2

Le signal

Principe de l'écho
de spin

Le contraste en T1,
T2 et densité
protonique

Mise en place des
événements d'une
séquence

On l'appelle également *relaxation spin-réseau* car ce phénomène s'accompagne, lors du retour des protons du niveau de haute énergie E2 sur le niveau de basse énergie E1, d'une émission d'énergie (restitution de l'énergie absorbée lors de l'excitation) par interaction (échange thermique) avec le milieu moléculaire environnant ou réseau.

L'ordre de grandeur pour le T1 des tissus biologiques est de 500 ms à 1000 ms. Le T1 varie avec la structure moléculaire ainsi que l'état solide ou liquide de la matière.

Tissus	T1	
	0,5 T	1,5 T
Muscle	550	870
Foie	325	490
Rein	495	650
Graisse	215	260
SB	540	785
SG	655	920
LCR	2000	3000

Un peu d'histoire

Le magnétisme nucléaire

Action d'un champ magnétique

Le phénomène de résonance magnétique

La relaxation

- T1 - T2

Le signal

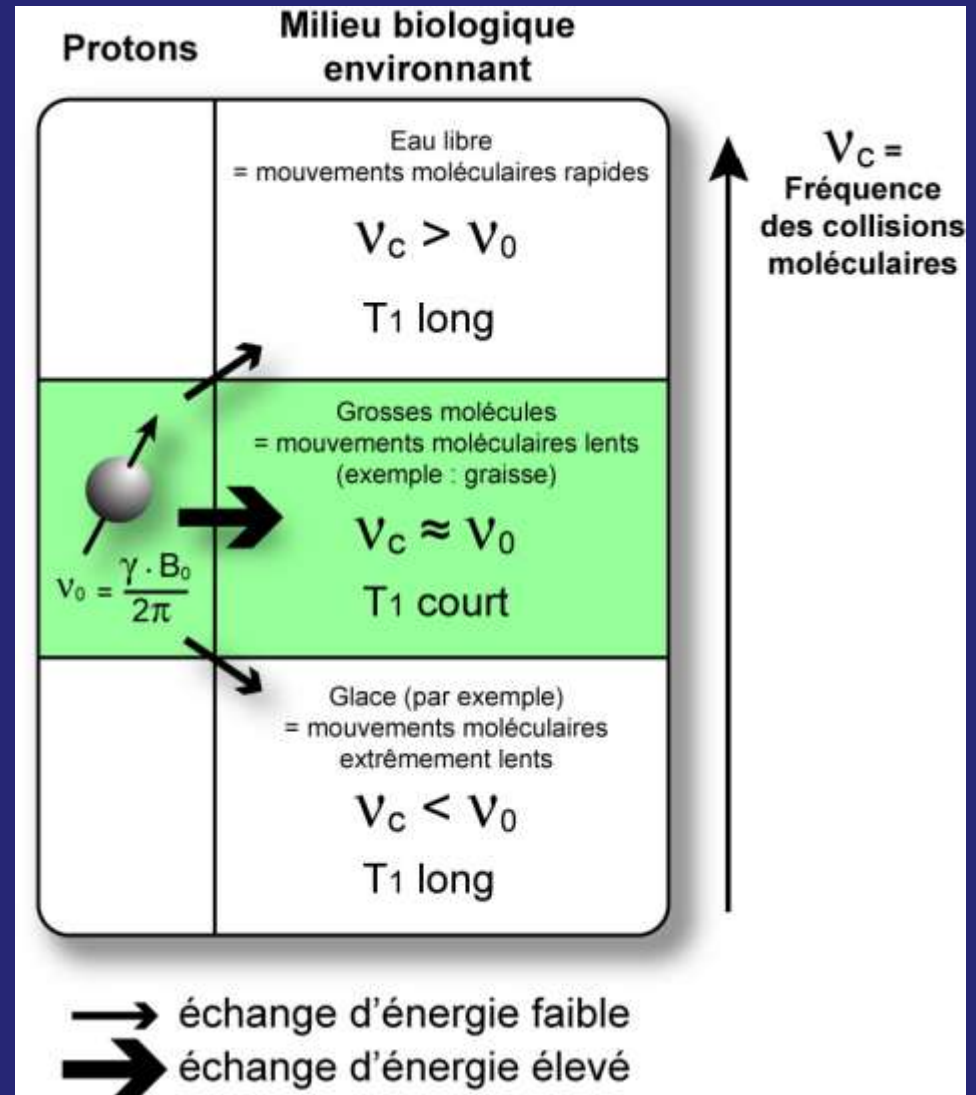
Principe de l'écho de spin

Le contraste en T1, T2 et densité protonique

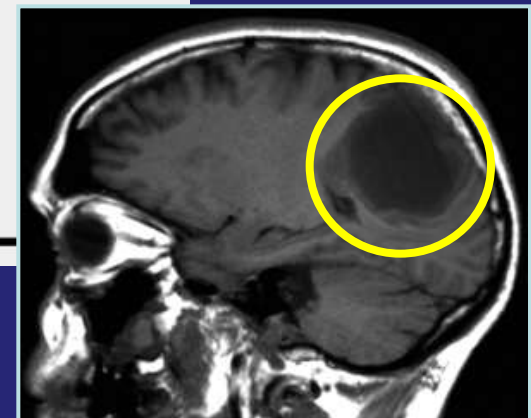
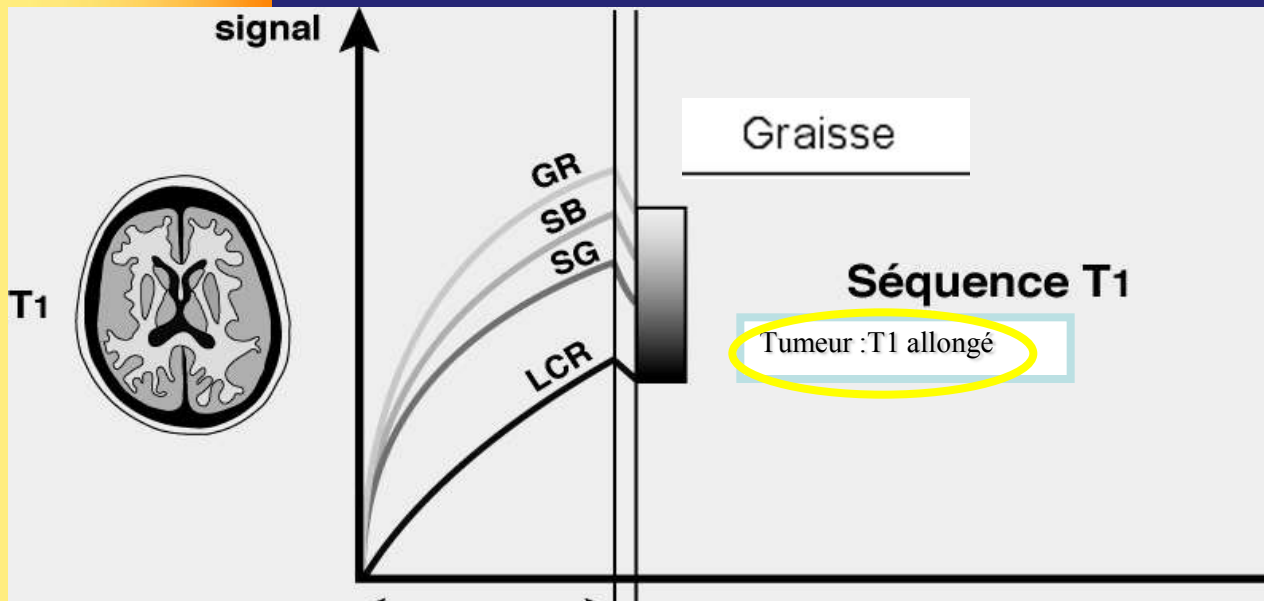
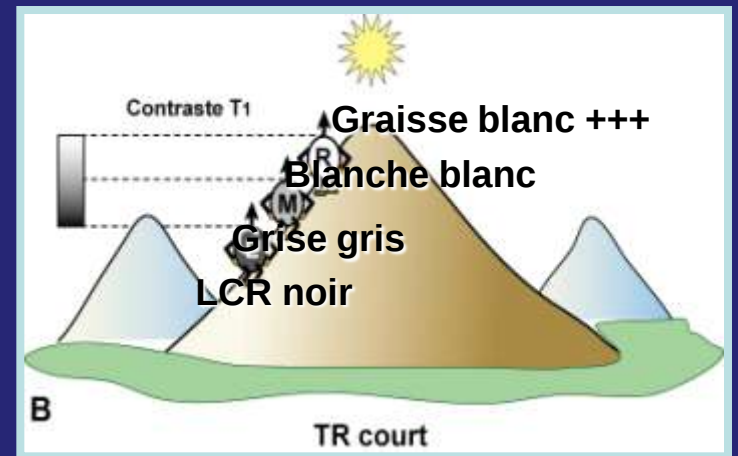
Mise en place des événements d'une séquence

Pourquoi de telles différences entre les tissus ?

Pour que les protons cèdent leur énergie au milieu biologique environnant, il faut que leur fréquence de précession ν_0 soit proche de la fréquence des collisions moléculaires ν_c (mouvements browniens).



Les valeurs de T1 sont proportionnelles à $\vec{B}_0$



Un peu d'histoire

Le magnétisme
nucléaire

Action d'un champ
magnétique

Le phénomène de
résonance
magnétique

La relaxation

- T1 - T2

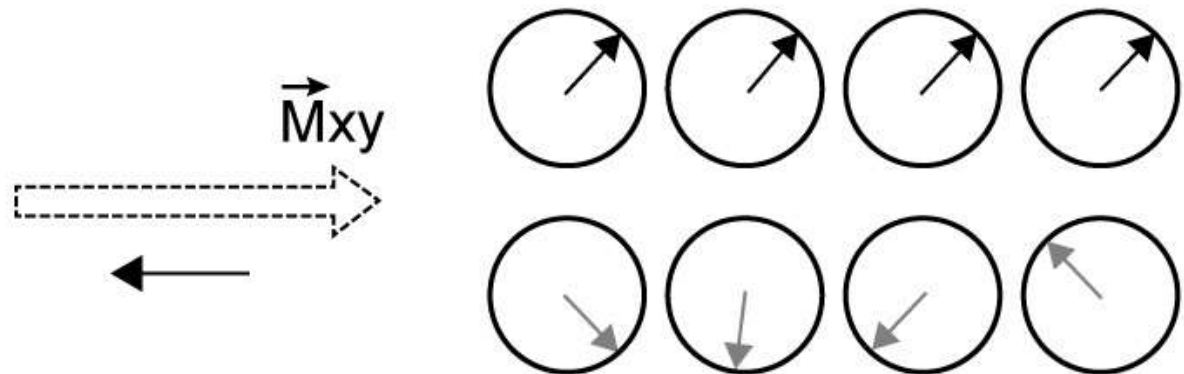
Le signal

Principe de l'écho
de spin

Le contraste en T1,
T2 et densité
protonique

Mise en place des
événements d'une
séquence

2. Déphasage des protons (on dit aussi perte de cohérence de phase des spins) ce qui entraîne une décroissance de $\vec{M}_{xy}$



C'est la *relaxation transversale T2*

Un peu d'histoire

Le magnétisme nucléaire

Action d'un champ magnétique

Le phénomène de résonance magnétique

La relaxation

- T1 - T2

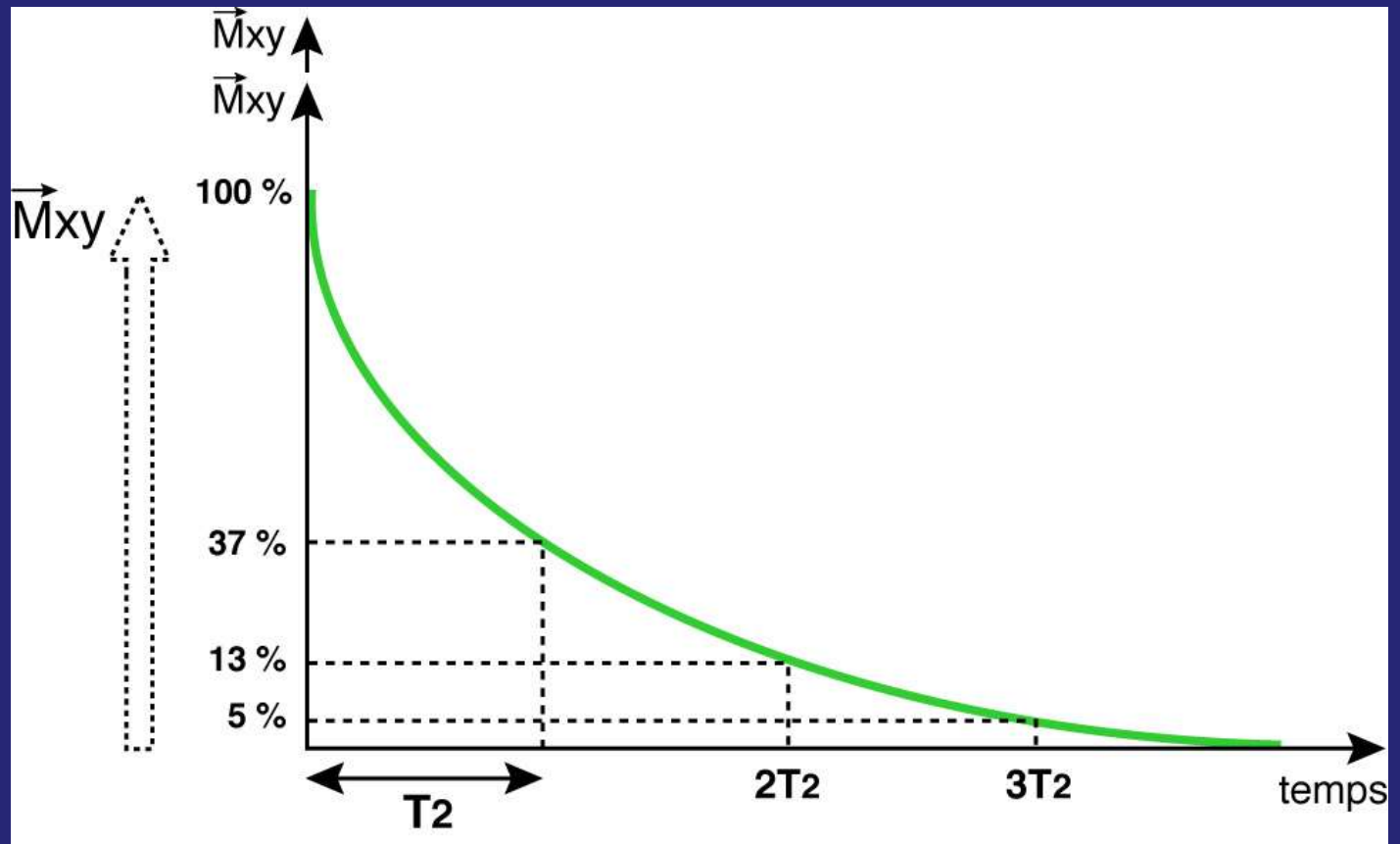
Le signal

Principe de l'écho de spin

Le contraste en T1, T2 et densité protonique

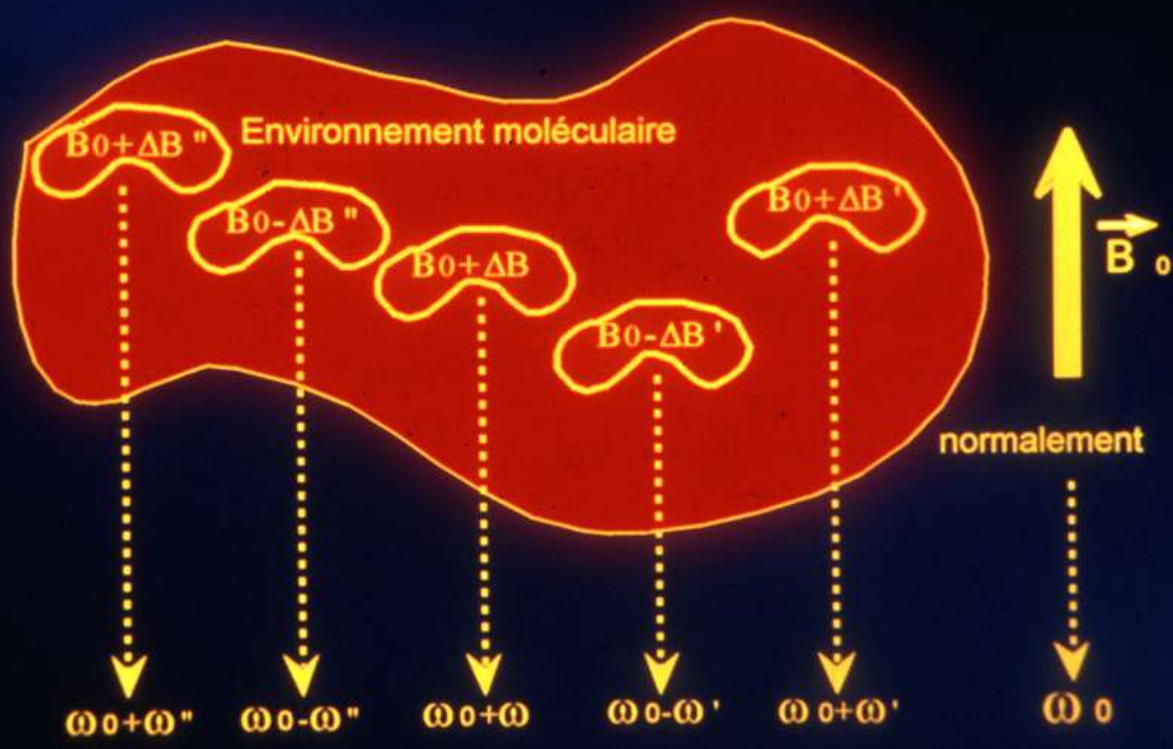
Mise en place des événements d'une séquence

T_2 est un temps (en ms) correspondant à la décroissance de $M_{xy} \Rightarrow$ c'est le temps mis par M_{xy} pour atteindre 37% de sa valeur initiale (M_{xy} a perdu 63%).



C'est une *exponentielle décroissante* :

$$M_{xy}(t) = M_0 e^{-t/T_2}$$



Un peu d'histoire

Le magnétisme
nucléaire

Action d'un champ
magnétique

Le phénomène de
résonance
magnétique

La relaxation

- T1 - T2

Le signal

Principe de l'écho
de spin

Le contraste en T1,
T2 et densité
protonique

Mise en place des
événements d'une
séquence

On l'appelle également *relaxation spin-spin* car ce phénomène est la conséquence d'une interaction des protons ("spins") entre eux.

L'ordre de grandeur pour le T2 des tissus biologiques est d'environ 50 ms à 100 ms. Comme le T1, le T2 varie avec la structure moléculaire ainsi qu'avec l'état solide ou liquide de la matière.

Tissus	T2
Muscle	47
Foie	50
Rein	60
Graisse	85
SB	90
SG	100
LCR	200

Un peu d'histoire

Le magnétisme
nucléaire

Action d'un champ
magnétique

Le phénomène de
résonance
magnétique

La relaxation

- T1 - T2

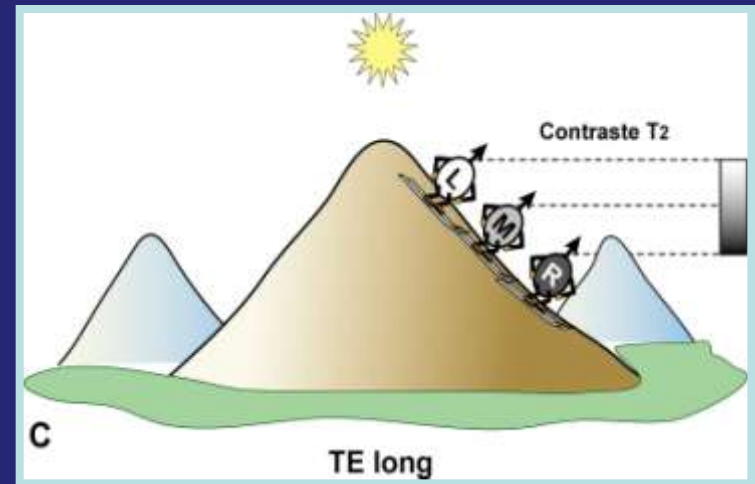
Le signal

Principe de l'écho
de spin

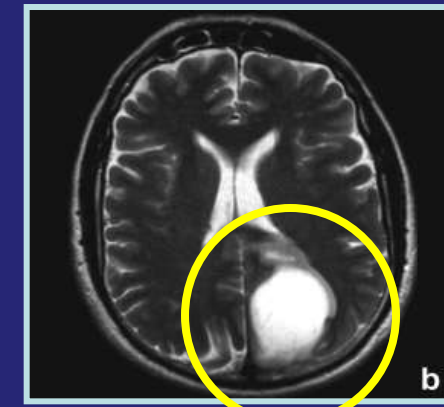
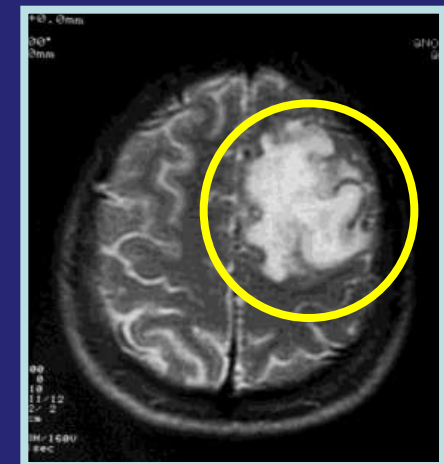
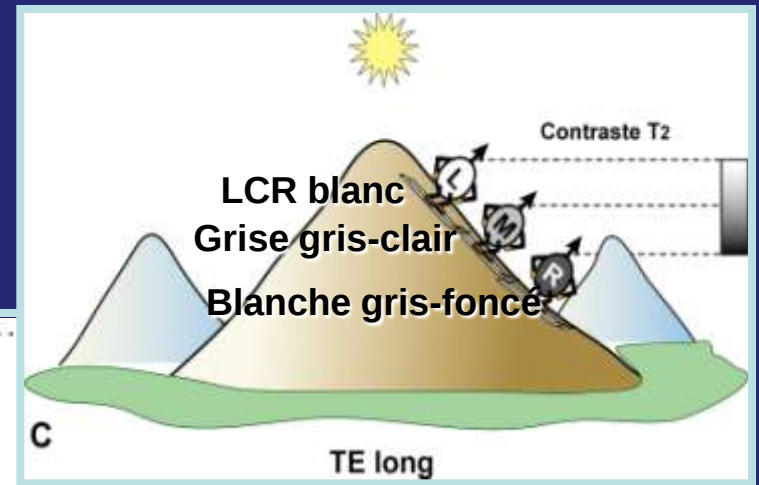
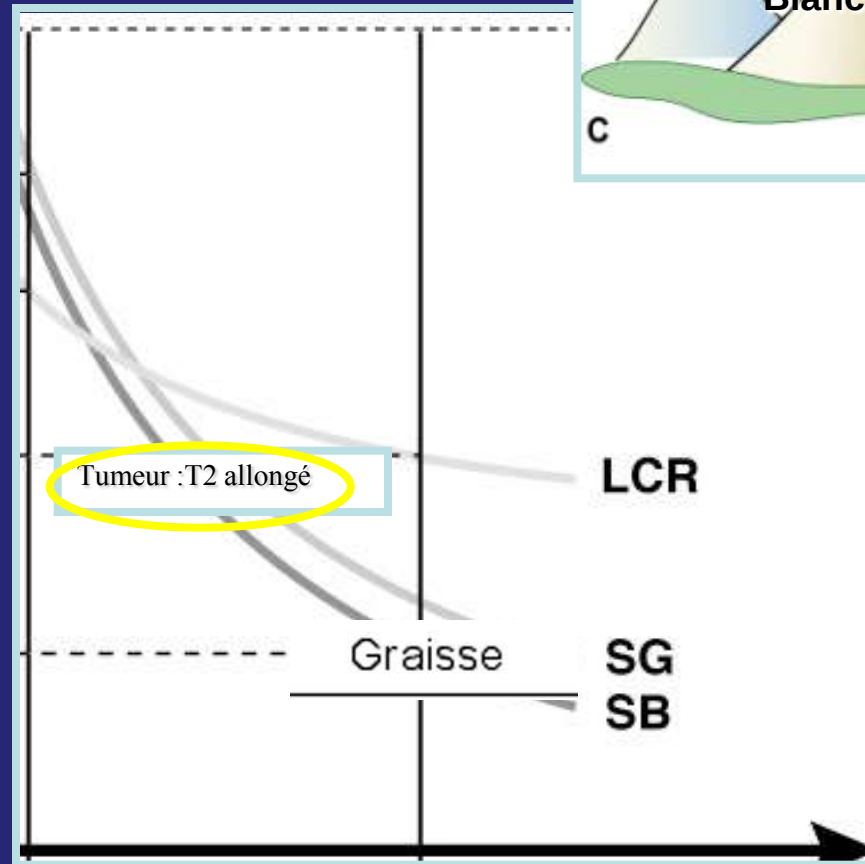
Le contraste en T1,
T2 et densité
protonique

Mise en place des
événements d'une
séquence

décroissance de $\vec{M}_{xy} \Rightarrow$ pas instantanée, bcp plus
rapide (10) repousse M_z)



C'est une *exponentielle décroissante* :



Un peu d'histoire

Le magnétisme
nucléaire

Action d'un champ
magnétique

Le phénomène de
résonance
magnétique

La relaxation

Le signal

Principe de l'écho
de spin

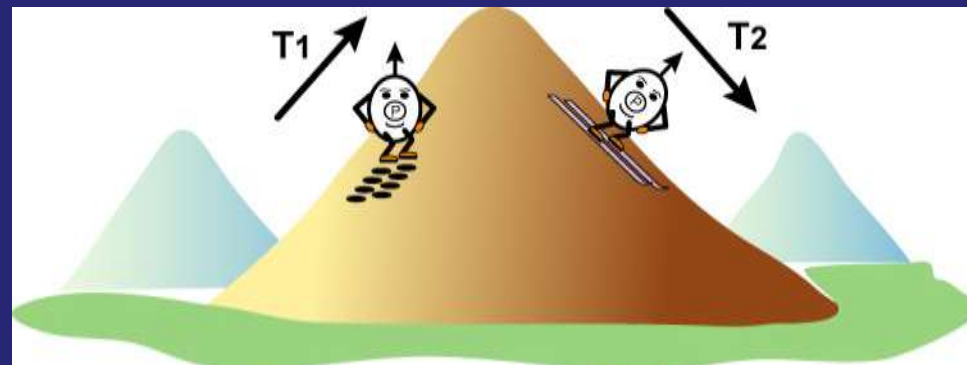
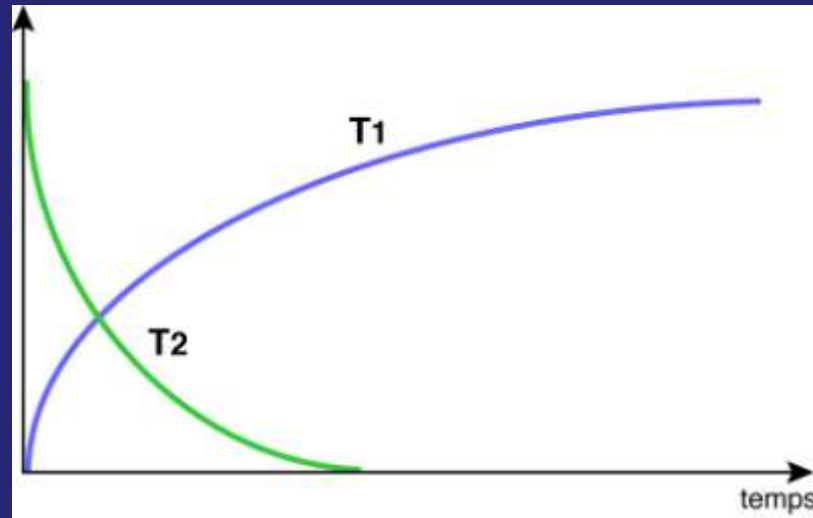
Le contraste en T1,
T2 et densité
protonique

Mise en place des
événements d'une
séquence

Durée T1/T2

≠ mécanismes

- Les T2 sont environ 10 fois plus courts que les T1.



TE 10 à 20 ms T2 (10 fois plus courts) T1 0,5 à 3s

Un peu d'histoire

Le magnétisme nucléaire

Action d'un champ magnétique

Le phénomène de résonance magnétique

La relaxation

Le signal

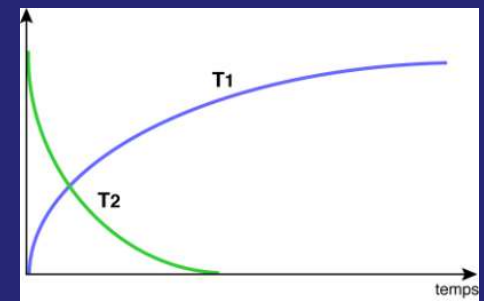
Principe de l'écho de spin

Le contraste en T1, T2 et densité protonique

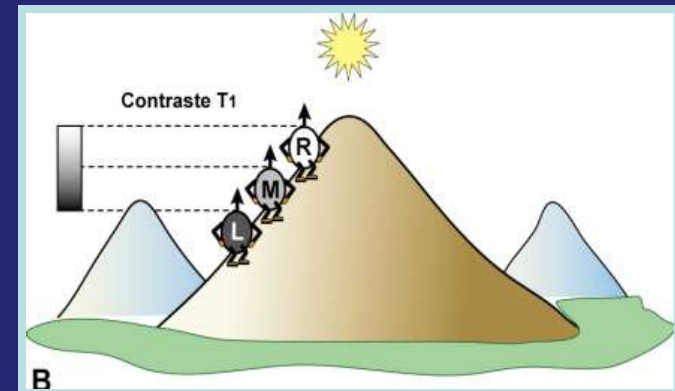
Mise en place des événements d'une séquence

Contraste T1/T2

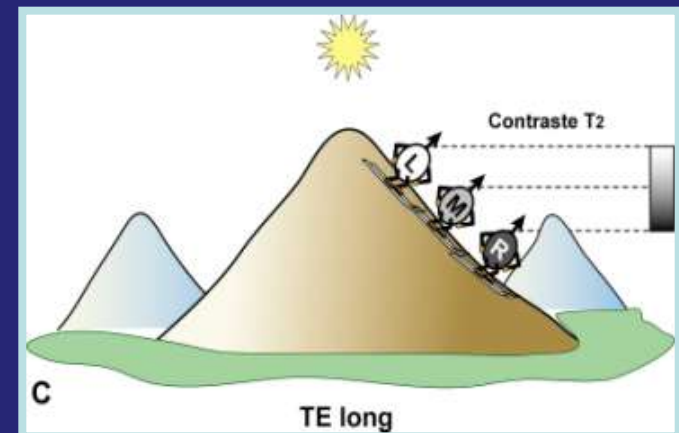
« Inversé »



-T1 aimantation repousse (mesure directe de la repousse): « sportif » T1 court = signal élevé blanc, « pas sportif » T1 court = noir



-T2 aimantation décroît (mesure de l'aimantation qui décroît impossible: mesure de ce qu'il reste): « sportif » T2 court = signal faible noir, « pas sportif » T2 long = blanc



Un peu d'histoire

Le magnétisme
nucléaire

Action d'un champ
magnétique

Le phénomène de
résonance
magnétique

La relaxation

Le contraste

Mise en place des
événements d'une
séquence

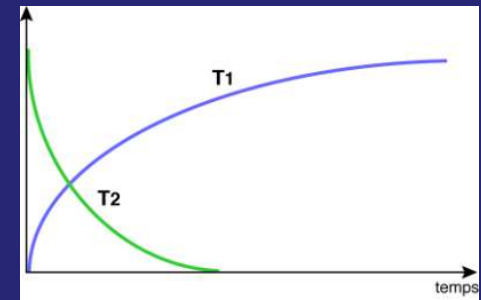
Contraste T1/T2

« Inversé »

Blanc T1/Noir T2

Noir T1/Blanc T2

(sauf graisse)



- « sportif T1 $\Rightarrow$ sportif T2 »

- « pas sportif T1 $\Rightarrow$ pas sportif T2 »

Un peu d'histoire

Le magnétisme nucléaire

Action d'un champ magnétique

Le phénomène de résonance magnétique

La relaxation

Le contraste

Mise en place des événements d'une séquence

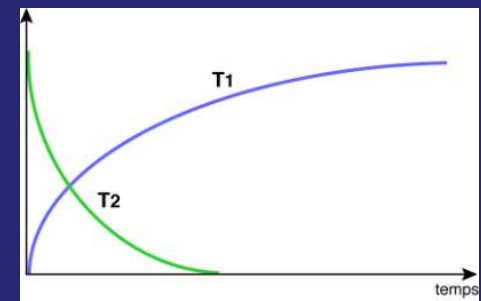
Contraste T1/T2

« Inversé »

Blanc T1/Noir T2

Noir T1/Blanc T2

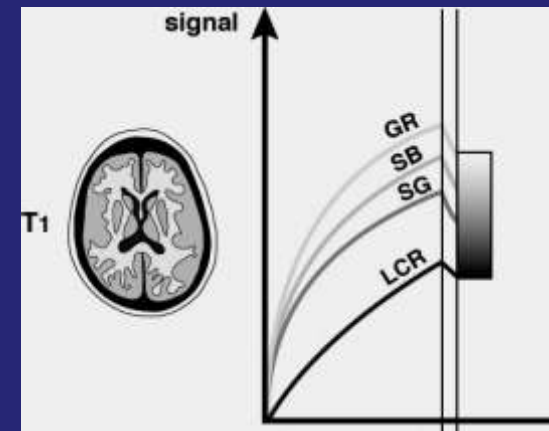
(sauf graisse)



- « sportif T1 $\Rightarrow$ sportif T2 »

- T1 (court) = signal élevé blanc T1

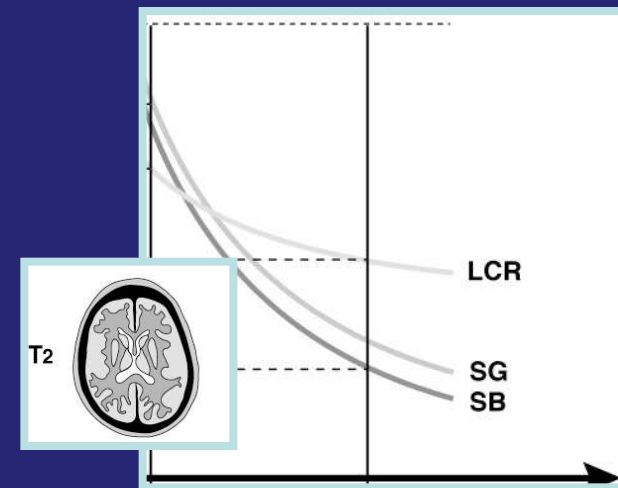
- T2 (court) = noir T2



- « pas sportif T1 $\Rightarrow$ pas sportif T2 »

- T1 (long) = signal faible noir T1

- « pas sportif » T2 (long) = blanc T2



Un peu d'histoire

Le magnétisme nucléaire

Action d'un champ magnétique

Le phénomène de résonance magnétique

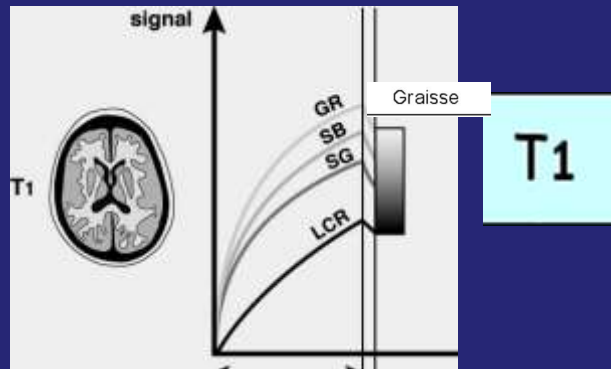
La relaxation

Le contraste en T1, T2

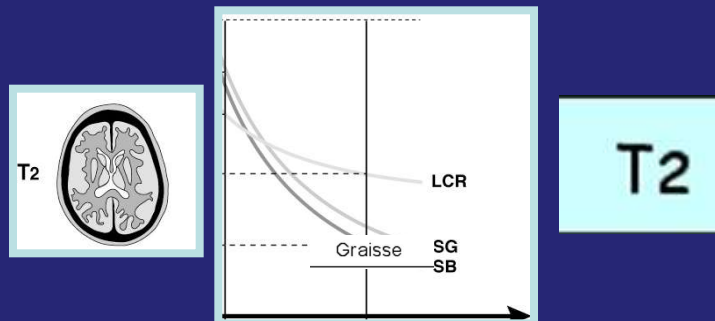
Mise en place des événements d'une séquence

Contraste T1/T2 « Inversé » B/N & N/B

Sauf Graisse en ES (blanc ESR)



Graisie	215	260
SB	540	785
SG	655	920
LCR	2000	3000



Graisie	85
SB	90
SG	100
LCR	200

Un peu d'histoire

Le magnétisme nucléaire

Action d'un champ magnétique

Le phénomène de résonance magnétique

La relaxation

Le contraste en T1, T2 et densité protonique

- Influence du TR

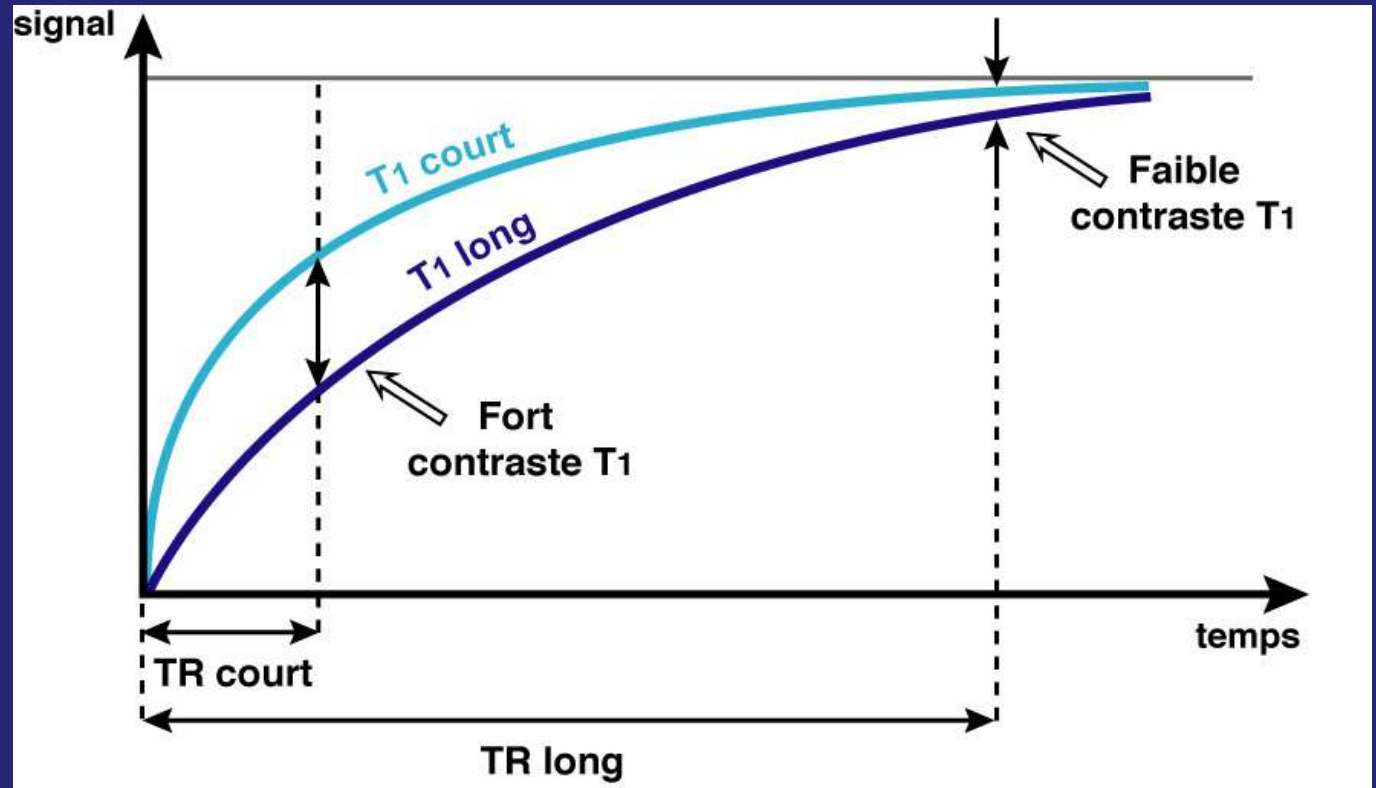
- Influence du TE

- Pondération en T1

- Pondération en ρ

- Pondération en T2

Le TR va ainsi conditionner le contraste en T1 c'est-à-dire la pondération en T1 d'une séquence (en fait, différencier la vitesse de repousse entre des tissus à T1 différents) :



TR court (0,5s) $\Rightarrow$ séquence pondérée en T1

TR long (2 à 3s) $\Rightarrow$ séquence dépondérée en T1

Un peu d'histoire

Le magnétisme nucléaire

Action d'un champ magnétique

Le phénomène de résonance magnétique

La relaxation

Le signal

Principe de l'écho de spin

Le contraste en T1, T2 et densité protonique

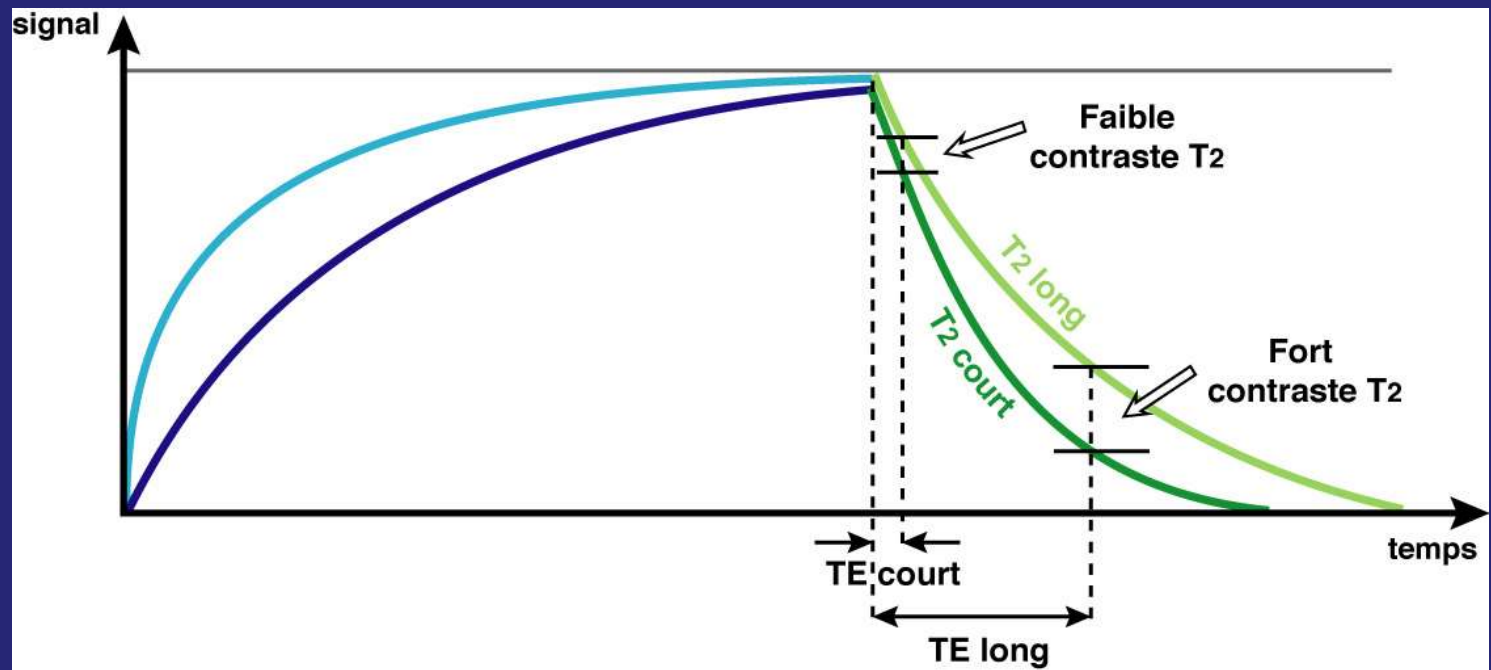
- Influence du TR
- Influence du TE
- Pondération en T1
- Pondération en ρ
- Pondération en T2

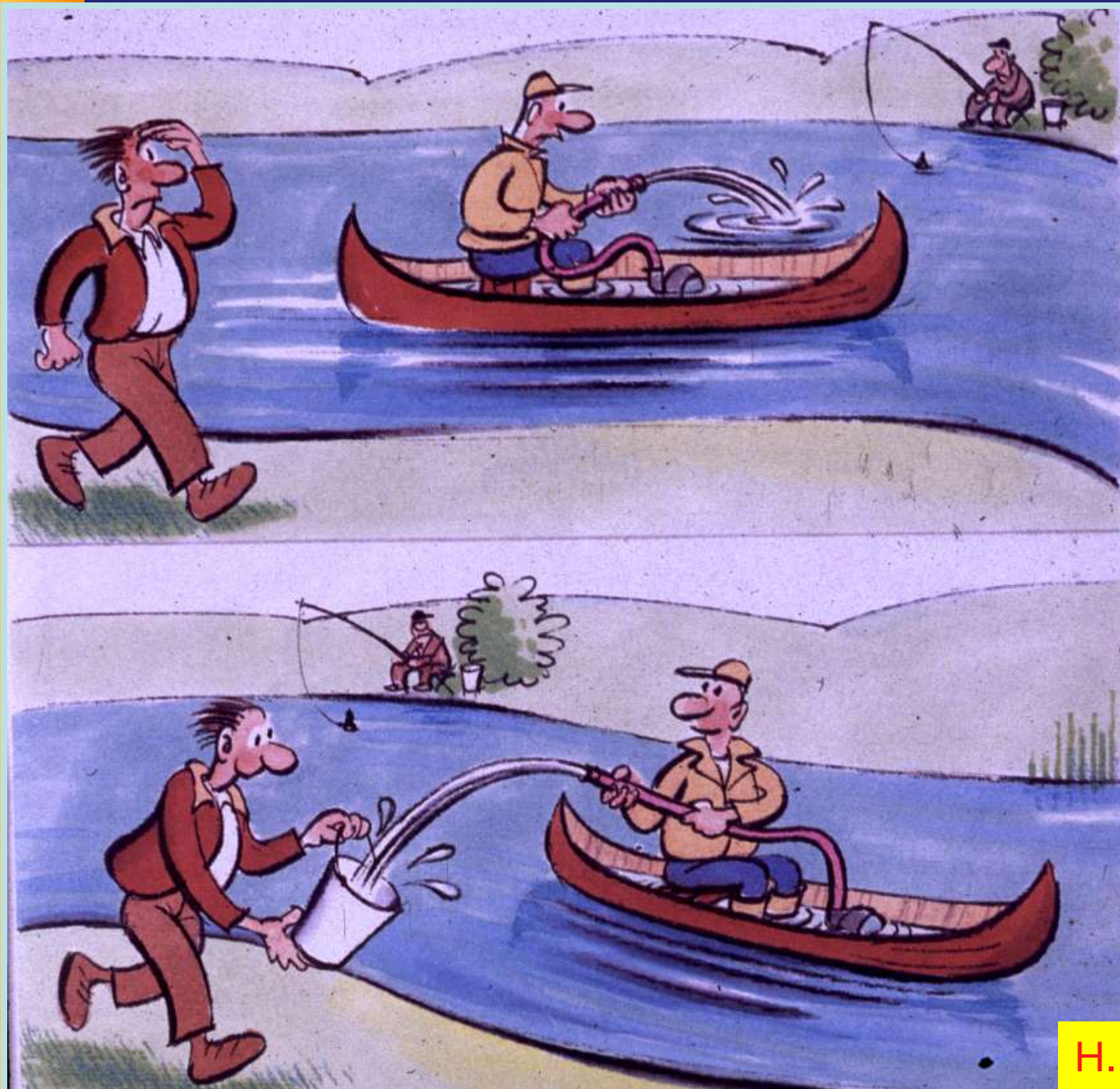
Influence du TE

Le TE conditionne donc la pondération en T2 d'une séquence :

TE long (120 ms) $\Rightarrow$ séquence pondérée en T2

TR court (10 à 20ms) $\Rightarrow$ séquence dépondérée en T2





H. Schild

Pondération en T1

Un peu d'histoire

Le magnétisme nucléaire

Action d'un champ magnétique

Le phénomène de résonance magnétique

La relaxation

Le signal

Principe de l'écho de spin

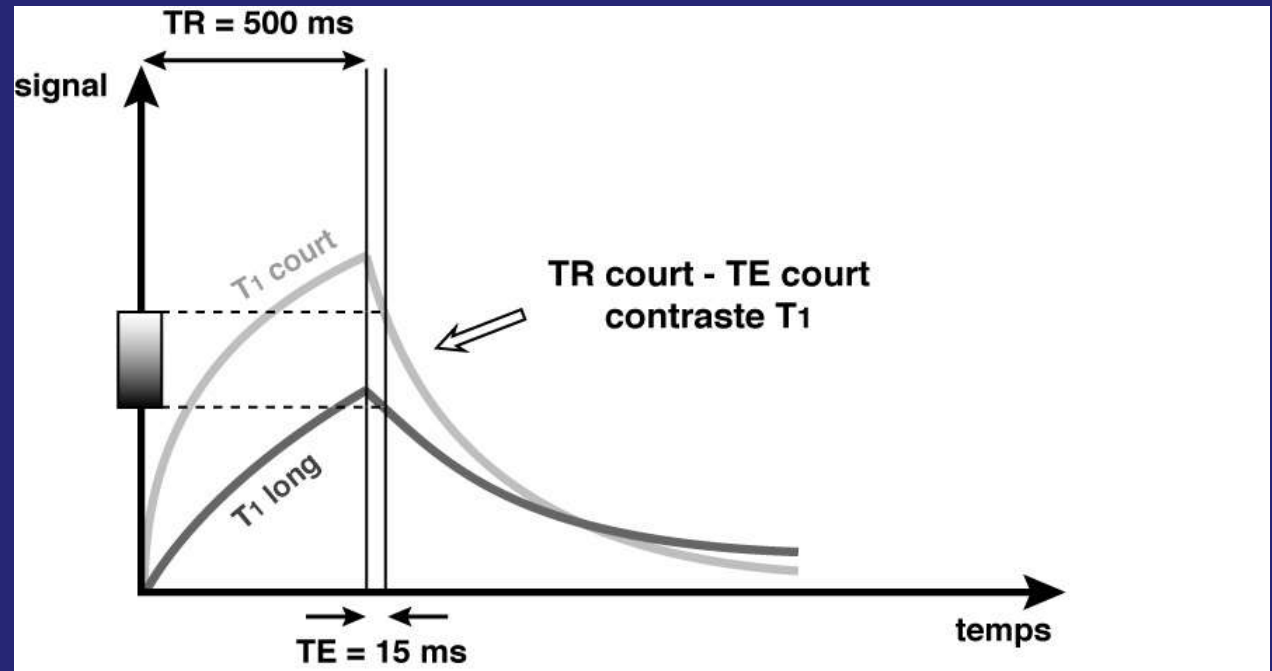
Le contraste en T1, T2 et densité protonique

- Influence du TR
- Influence du TE
- Pondération en T1
- Pondération en ρ
- Pondération en T2

TR court (400 à 600 ms) pour favoriser le contraste en T1 (pondération en T1).

TE court (15 ms) pour minimiser le contraste en T2 (dépondération en T2).

Tout est court en T1 : TR et TE. C'est le tissu avec le T1 le plus court qui donne le plus de signal (le plus blanc).



Application au système nerveux central

Un peu d'histoire

Le magnétisme nucléaire

Action d'un champ magnétique

Le phénomène de résonance magnétique

La relaxation

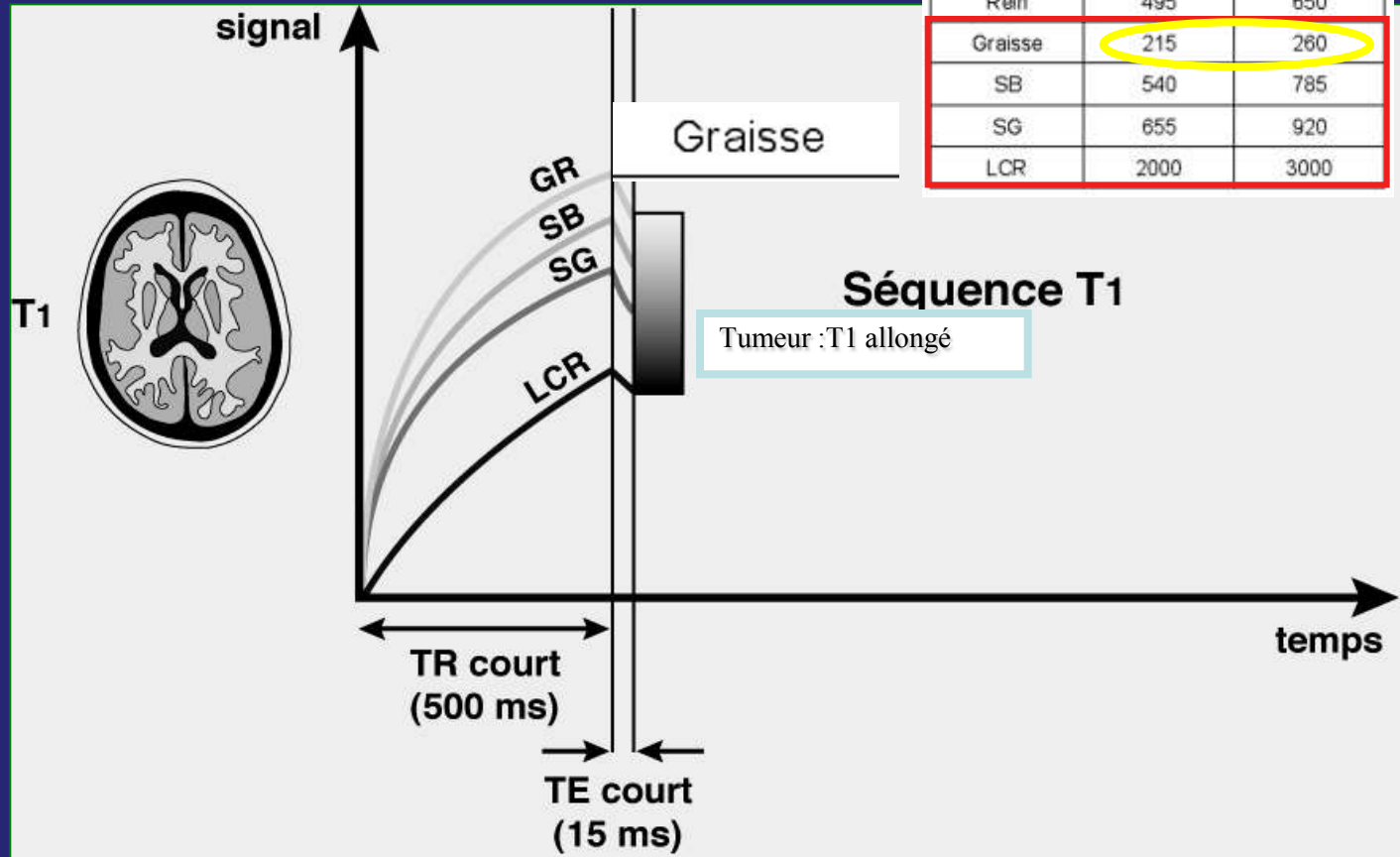
Le signal

Principe de l'écho de spin

Le contraste en T1, T2 et densité protonique

- Influence du TR
- Influence du TE
- Pondération en T1
- Pondération en ρ
- Pondération en T2

Tissus	T1	
	0,5 T	1,5 T
Muscle	550	870
Foie	325	490
Rein	495	650
Graisse	215	260
SB	540	785
SG	655	920
LCR	2000	3000



Application au système nerveux central

Un peu d'histoire

Le magnétisme nucléaire

Action d'un champ magnétique

Le phénomène de résonance magnétique

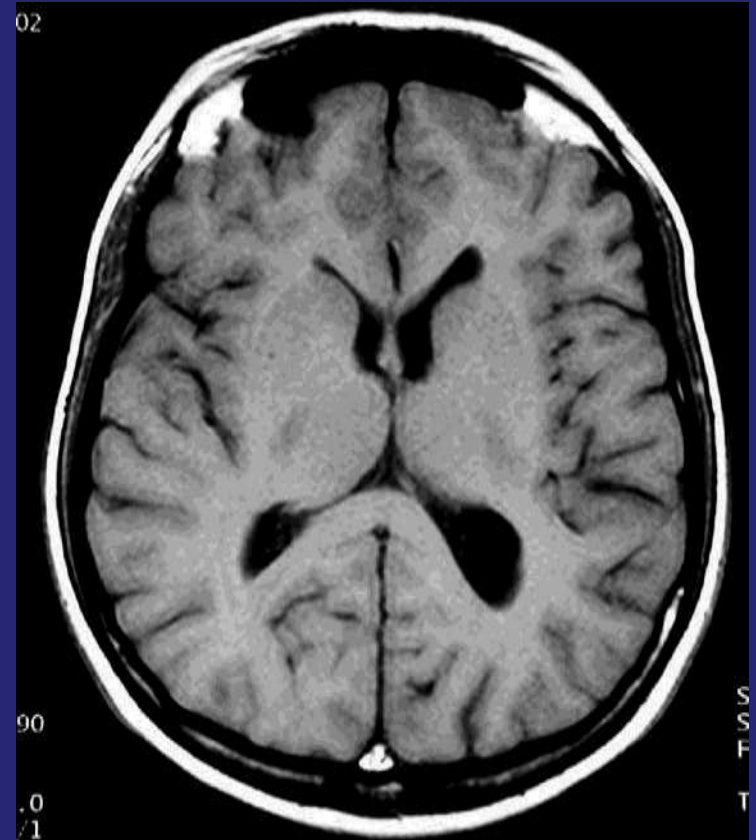
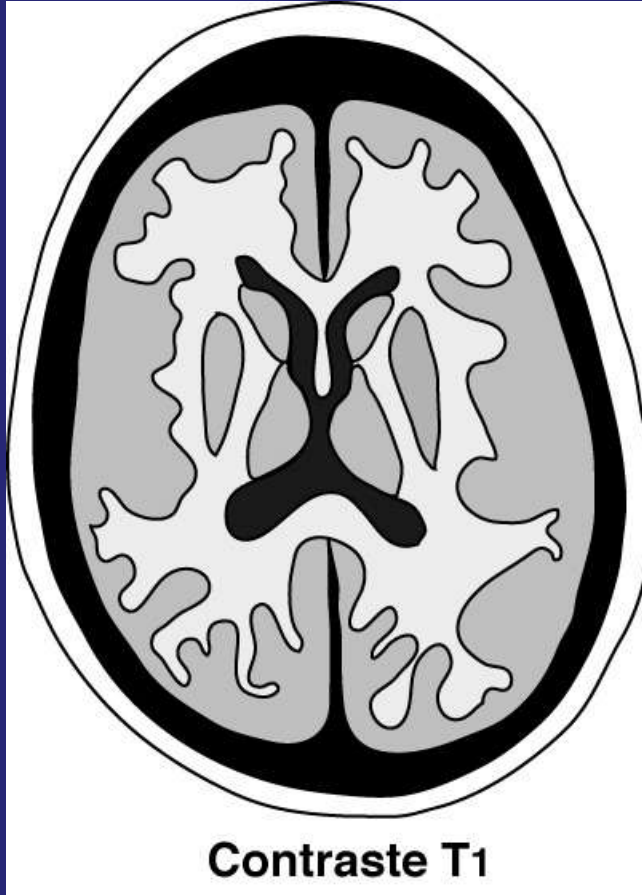
La relaxation

Le signal

Principe de l'écho de spin

Le contraste en T1, T2 et densité protonique

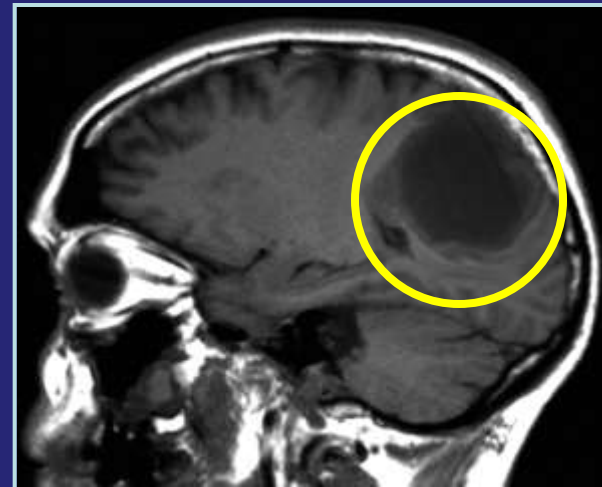
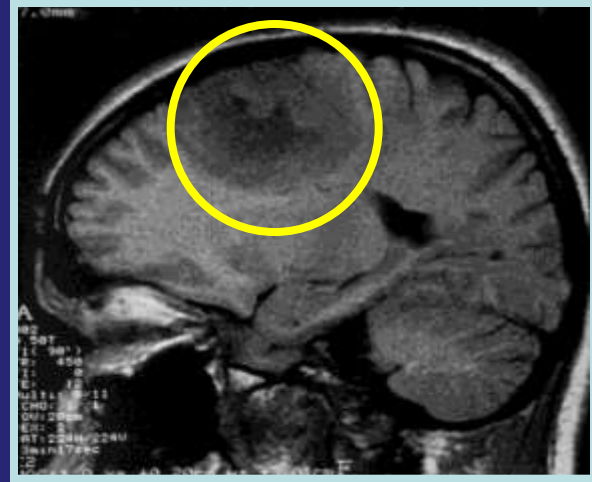
- Influence du TR
- Influence du TE
- **Pondération en T1**
- Pondération en ρ
- Pondération en T2



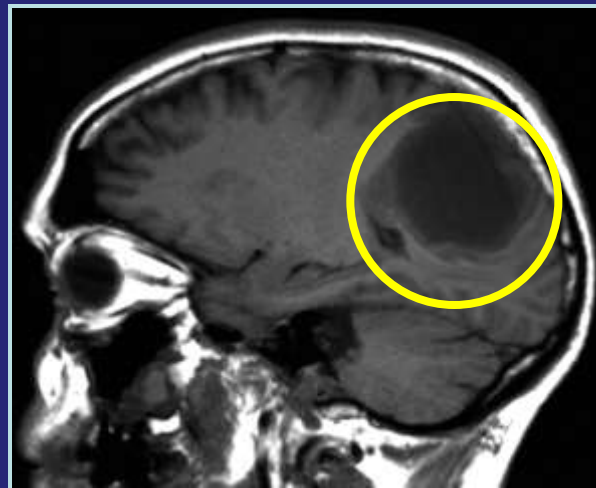
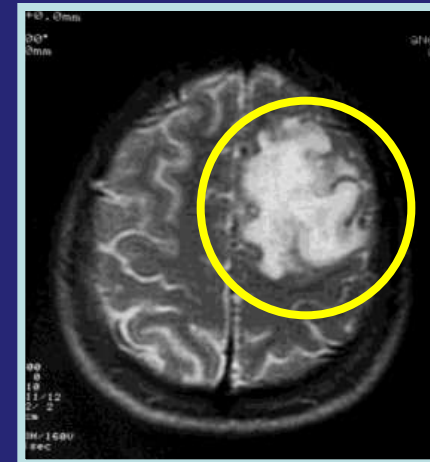
Echo de gradient (Vx blanc /noir ES)

PONDERATION T1

- SEQUENCE « COURTE »
T1 : TR & TE COURTS
- Contraste « **ANATOMIQUE** »
: SB ➔ BLANCHE
- SG ➔ GRISE, LCR ➔ NOIR
- T1 court « hypersignal »
- Lésion T1 long (inflation hydrique) ➔ « hyposignal »
- Craisse T1 très court ➔ « hypersignal »
- Os - air ➔ pas de signal

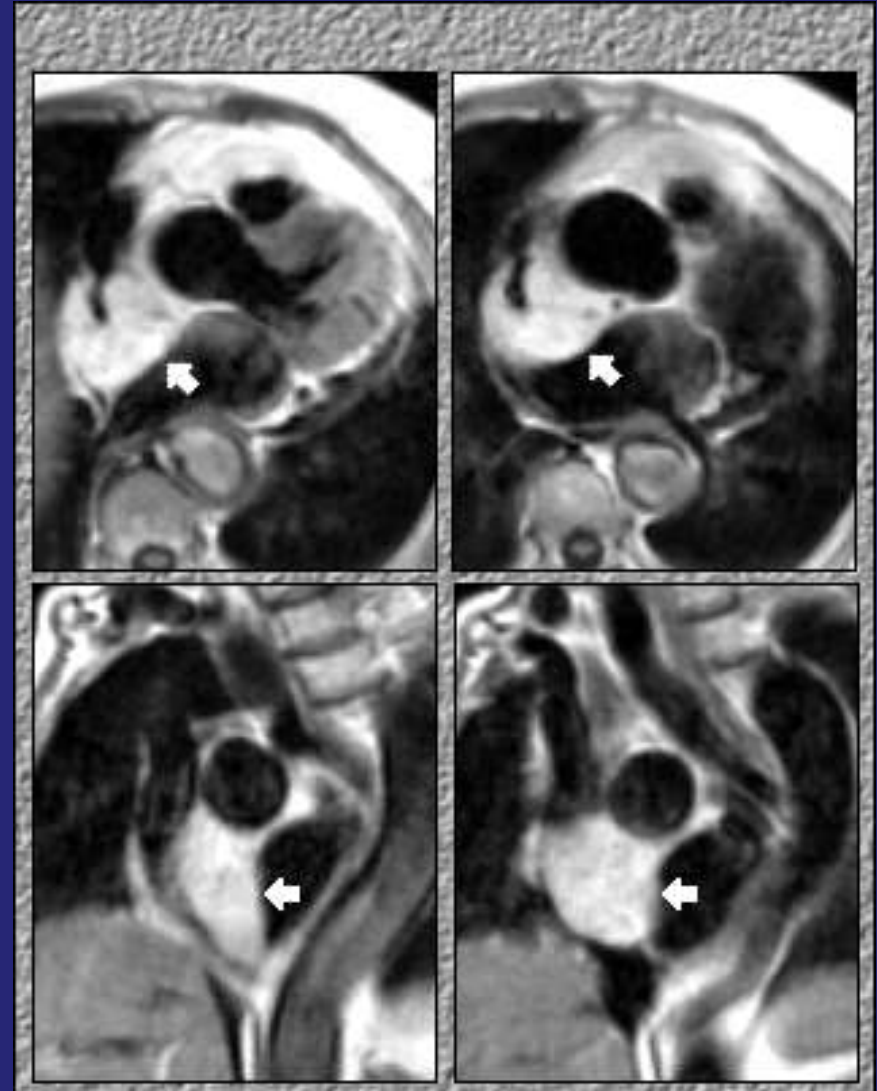
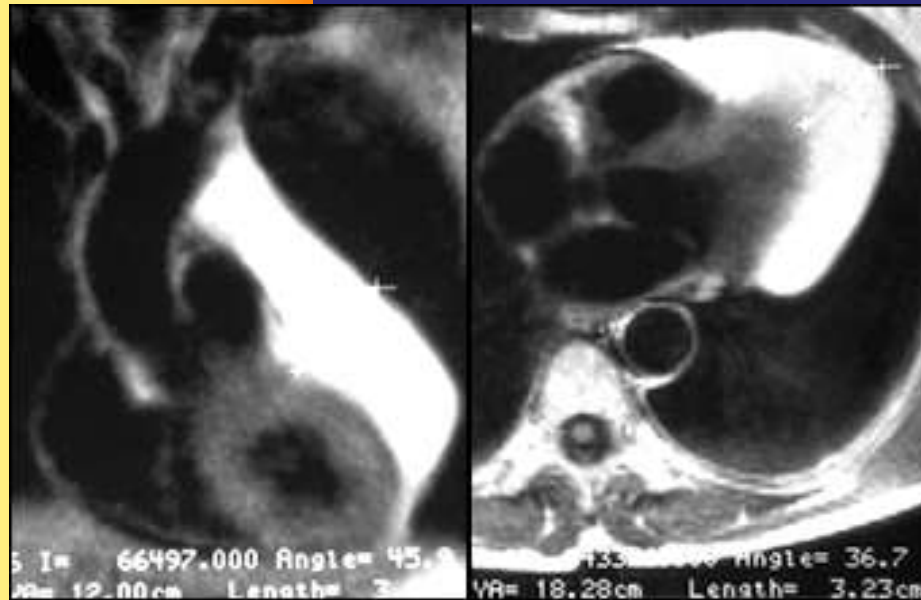


A sagittal T1-weighted MRI scan of the brain. A yellow circle highlights a large, well-defined, hypointense (darker) mass in the frontal lobe, consistent with the location of the tumor described in the text. The mass appears to be displacing the surrounding brain tissue. Technical parameters visible in the bottom left corner include: TR: 500, TE: 450, TI: 0, and other standard MRI settings.



Peuvent induire un hypersignal en T1 : la graisse (lipome, kyste dermoïde), un agent paramagnétique: contraste gadolinium, caillot de sang (kyste endométriosique ovarien), kyste colloïde, MTSA mélanome la présence de protéines dans un liquide, un phénomène de flux (EG/ES).

Lipomes = hypersignal T1 intense



Pondération en T2

Un peu d'histoire

Le magnétisme nucléaire

Action d'un champ magnétique

Le phénomène de résonance magnétique

La relaxation

Le signal

Principe de l'écho de spin

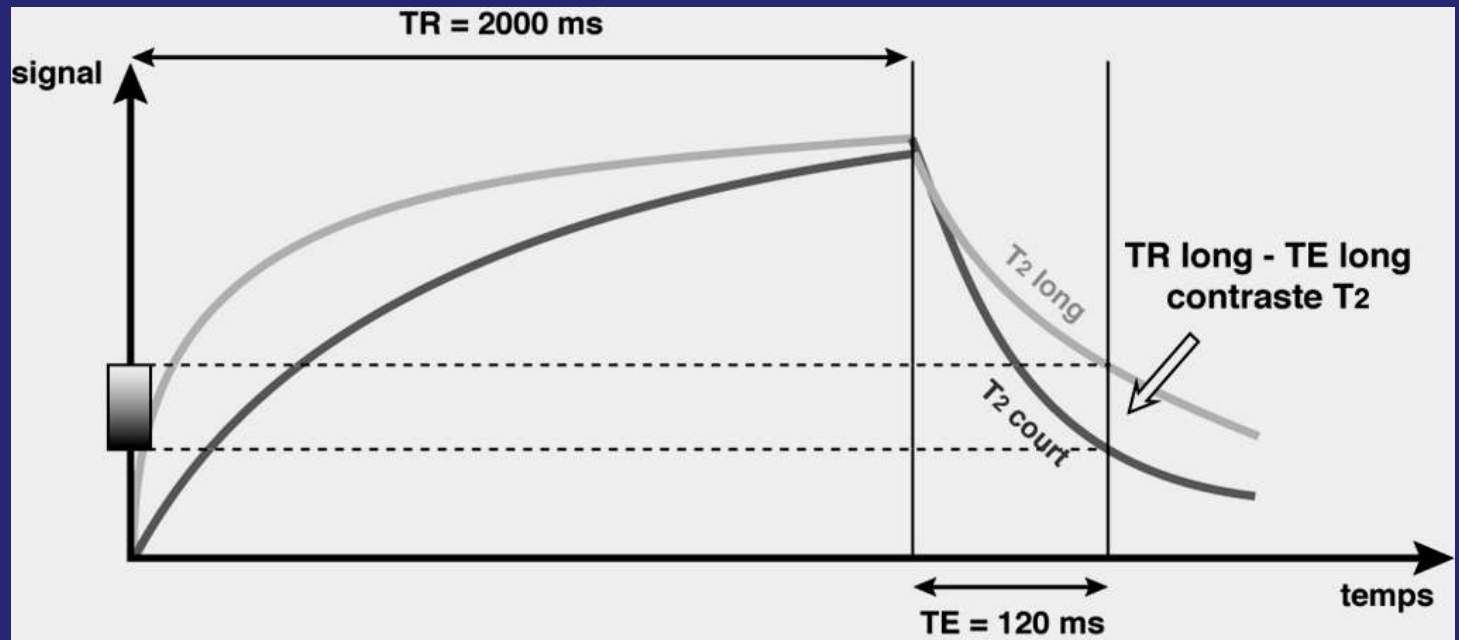
Le contraste en T1, T2 et densité protonique

- Influence du TR
- Influence du TE
- Pondération en T1
- Pondération en ρ
- Pondération en T2

TR long (2000 ms) pour minimiser le contraste en T1 (dépondération en T1).

TE long (120 ms) pour favoriser le contraste en T2 (pondération en T2).

Tout est long en T2 : TR et TE. C'est le tissu avec le T2 le plus long qui donne le plus de signal (le plus blanc).



Application au système nerveux central

Un peu d'histoire

Le magnétisme nucléaire

Action d'un champ magnétique

Le phénomène de résonance magnétique

La relaxation

Le signal

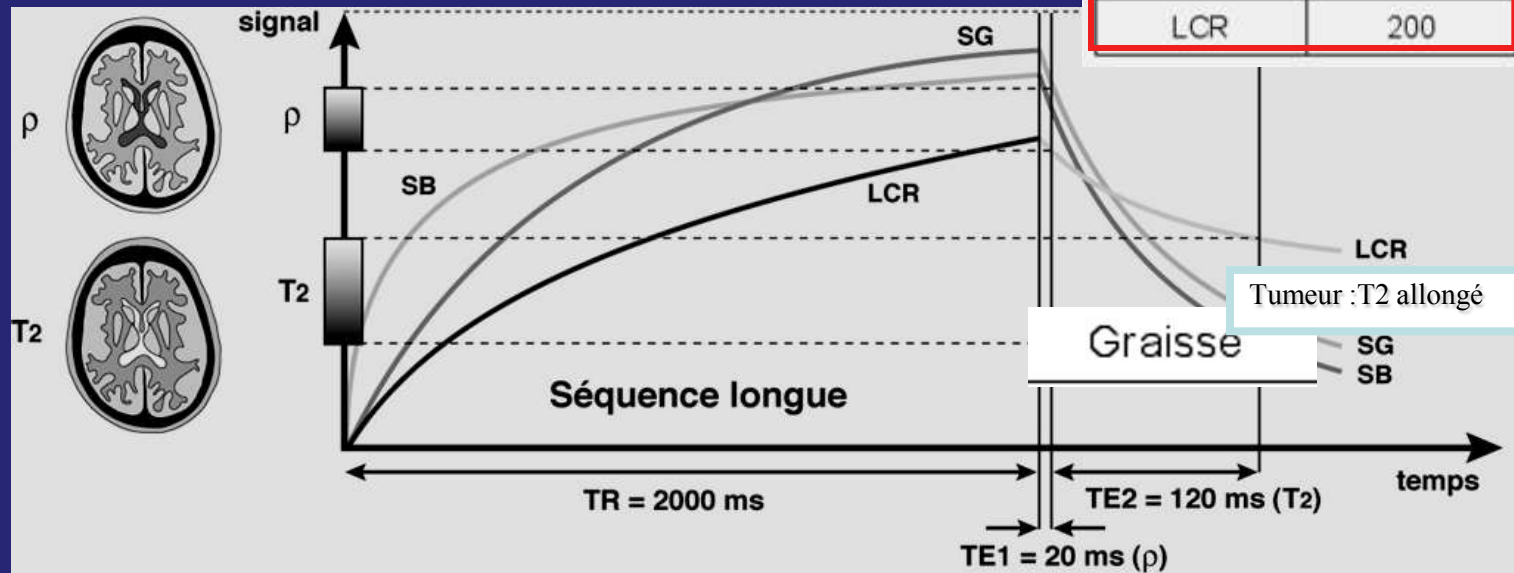
Principe de l'écho de spin

Le contraste en T1, T2 et densité protonique

- Influence du TR
- Influence du TE
- Pondération en T1
- Pondération en ρ
- Pondération en T2

Au cours d'une même séquence (à TR long), on peut obtenir deux « séries » d'images, l'une pondérée en ρ et l'autre en T2, en fonction du TE utilisé.

Tissus	T2
Muscle	47
Foie	50
Rein	60
Graisse	85
SB	90
SG	100
LCR	200



Application au système nerveux central

Un peu d'histoire

Le magnétisme nucléaire

Action d'un champ magnétique

Le phénomène de résonance magnétique

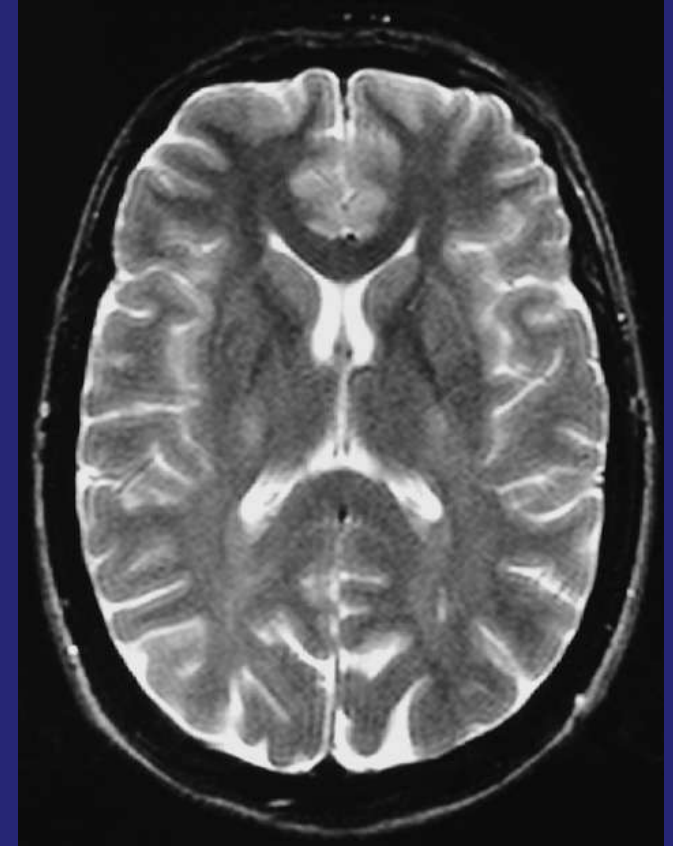
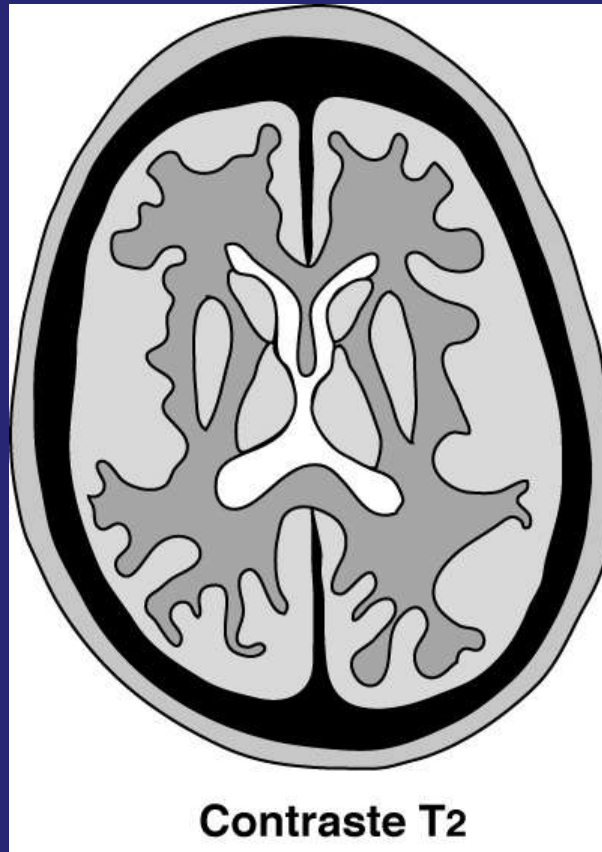
La relaxation

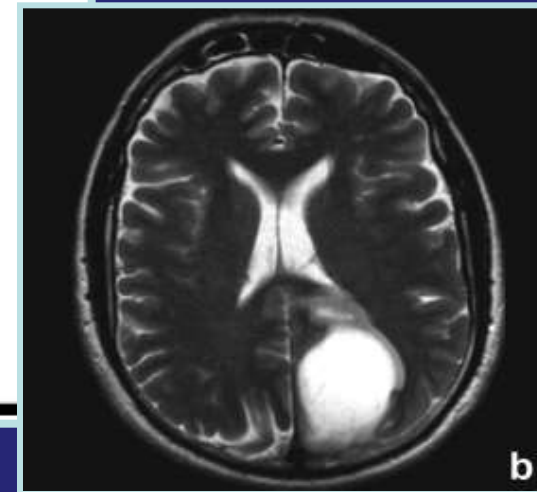
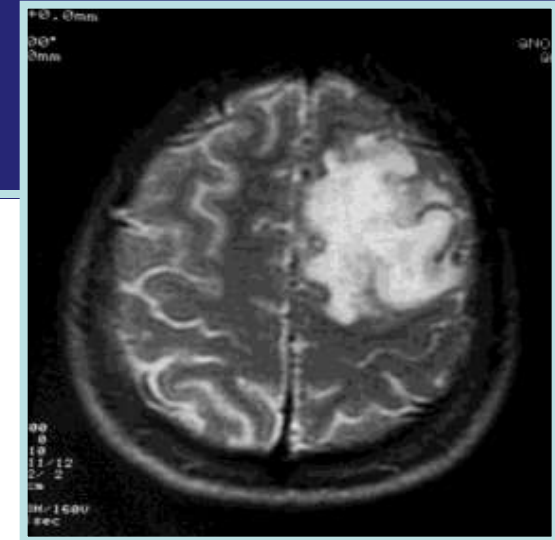
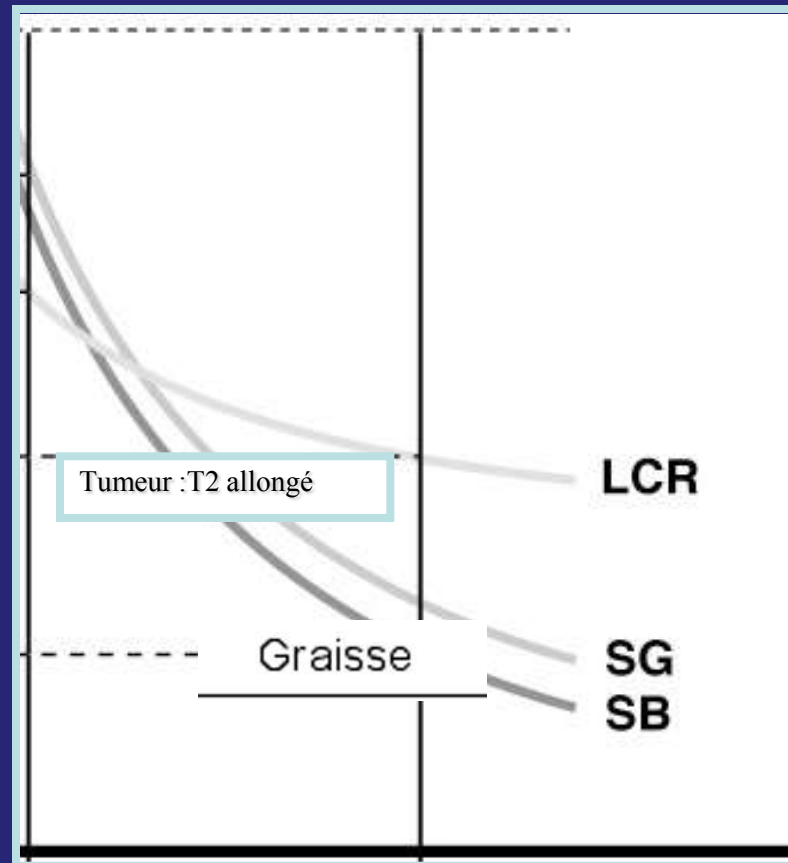
Le signal

Principe de l'écho de spin

Le contraste en T1, T2 et densité protonique

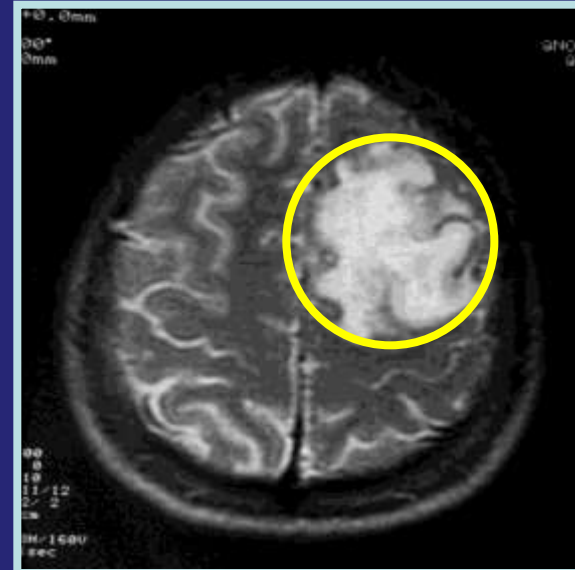
- Influence du TR
- Influence du TE
- Pondération en T1
- Pondération en ρ
- Pondération en T2





PONDERATION T2

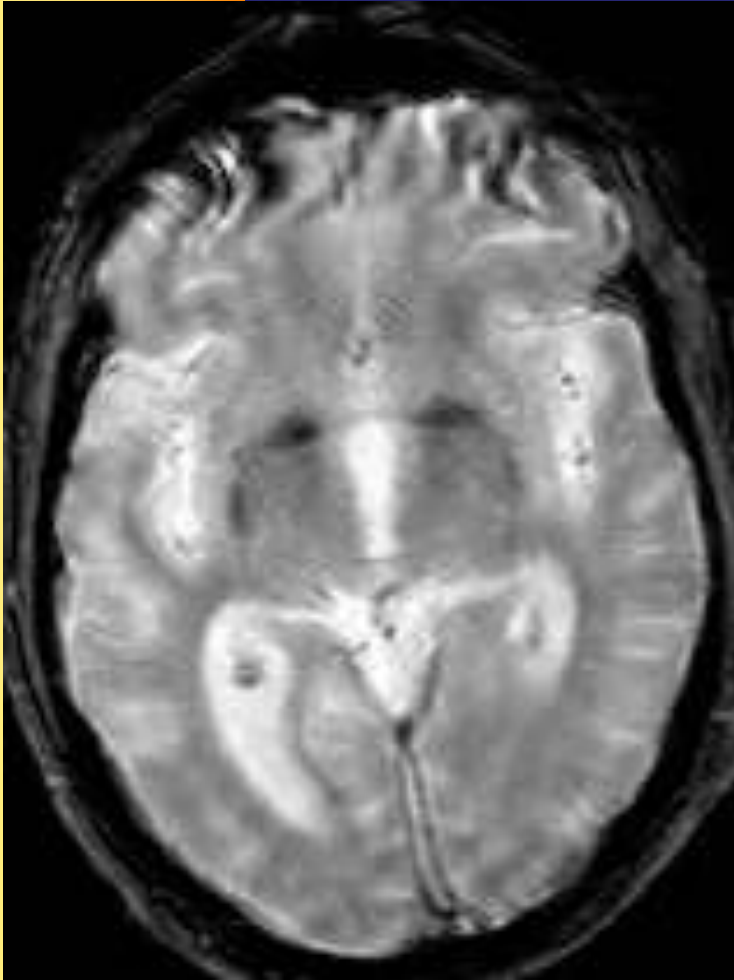
- SEQUENCE « LONGUE »
T2 : TR & TE LONGS
- Contraste « **INVERSE** » :
LCR ➔ BLANC, SG ➔
GRIS-CLAIR, SB ➔
GRIS-FONCE
- T2 long « hypersignal »
- Lésion T2 long (inflation
hydrique) ➔
« hypersignal » « flashe »
- Graisse T2 moyen ➔
« chute de signal modérée
= cerveau »
- Os - air ➔ pas de signal



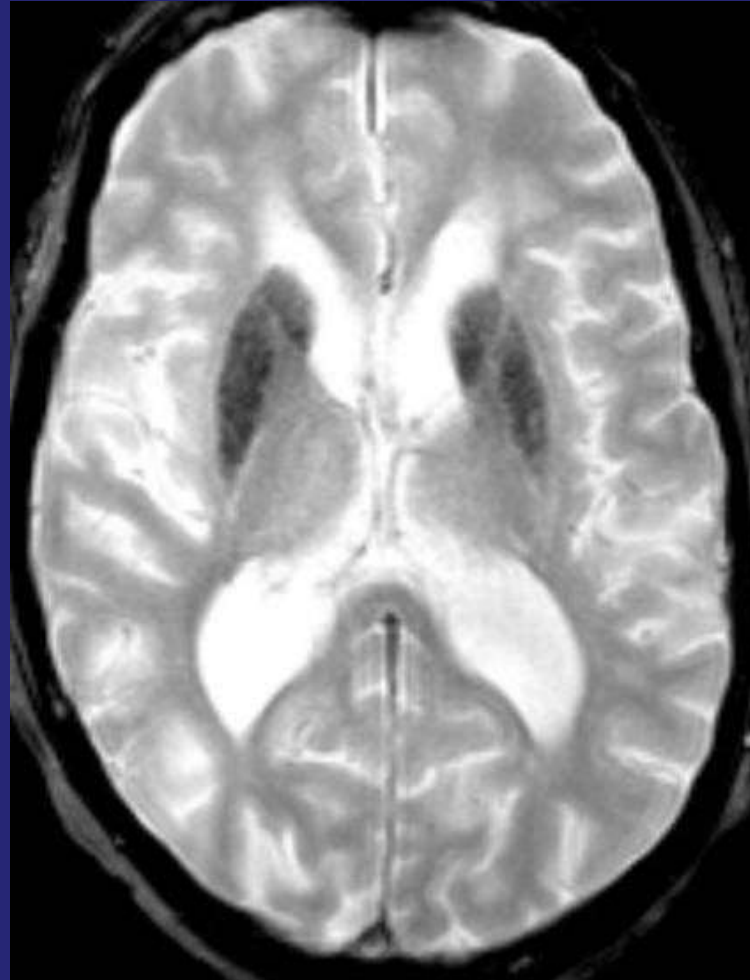
Peuvent induire un hyposignal en T2 :

- Calcifications,
- Susceptibilité magnétique: hématome (T2*), air cavité
- Vaisseaux traversent la coupe

Calcifications

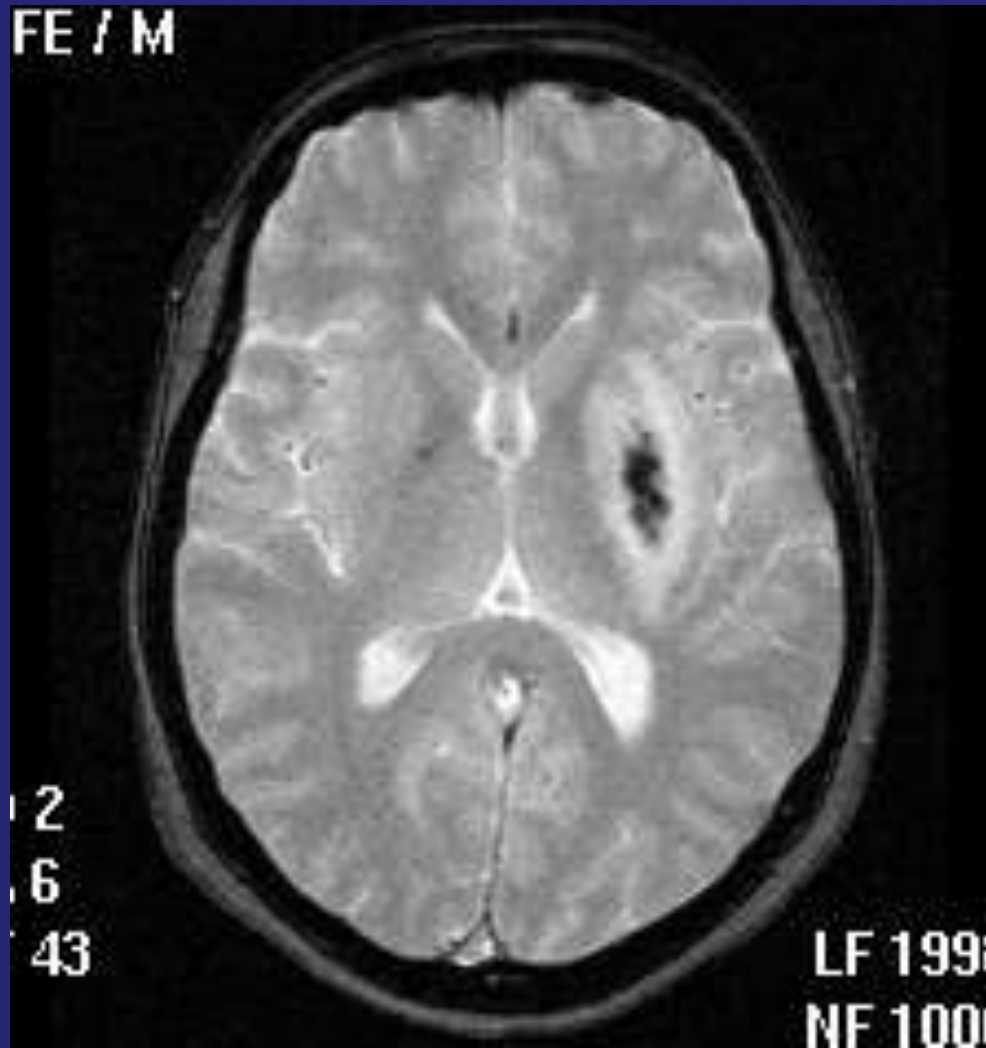


Pallidum = normal



Putamen/Caudé = AMS-P

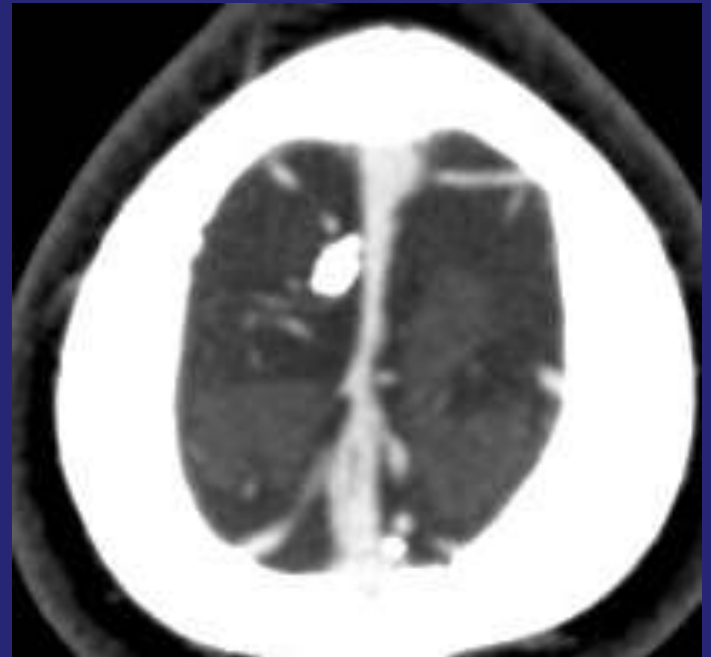
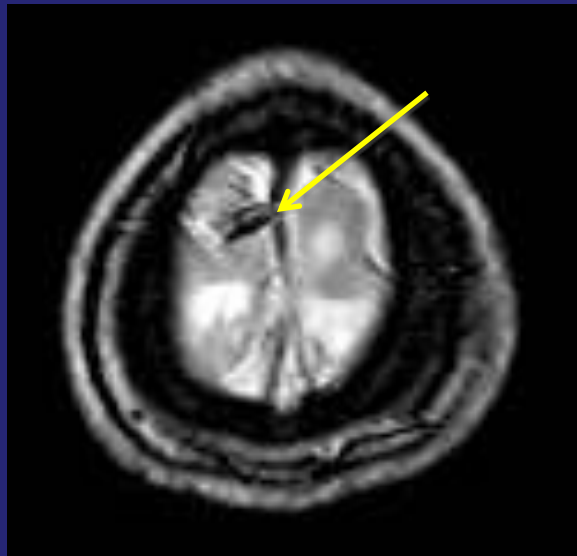
AK, Grenoble



Avc hémorragique Patient HTA,
hémosidérine T2* +++

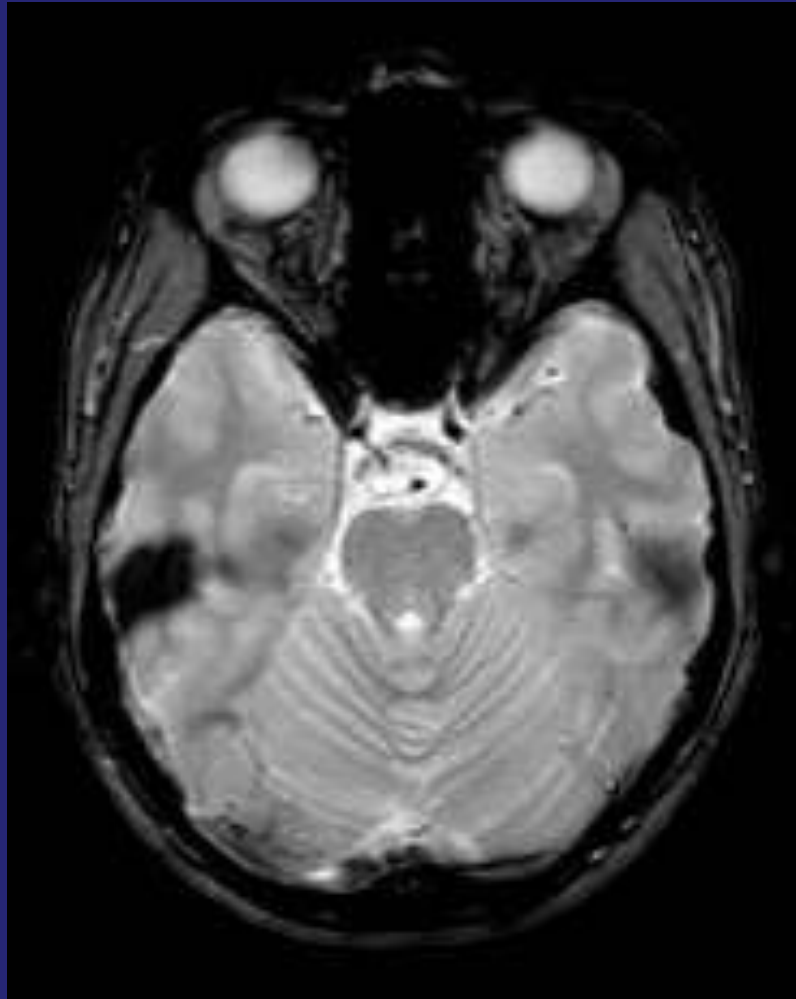
Courtesy S.Grand

Cacifications



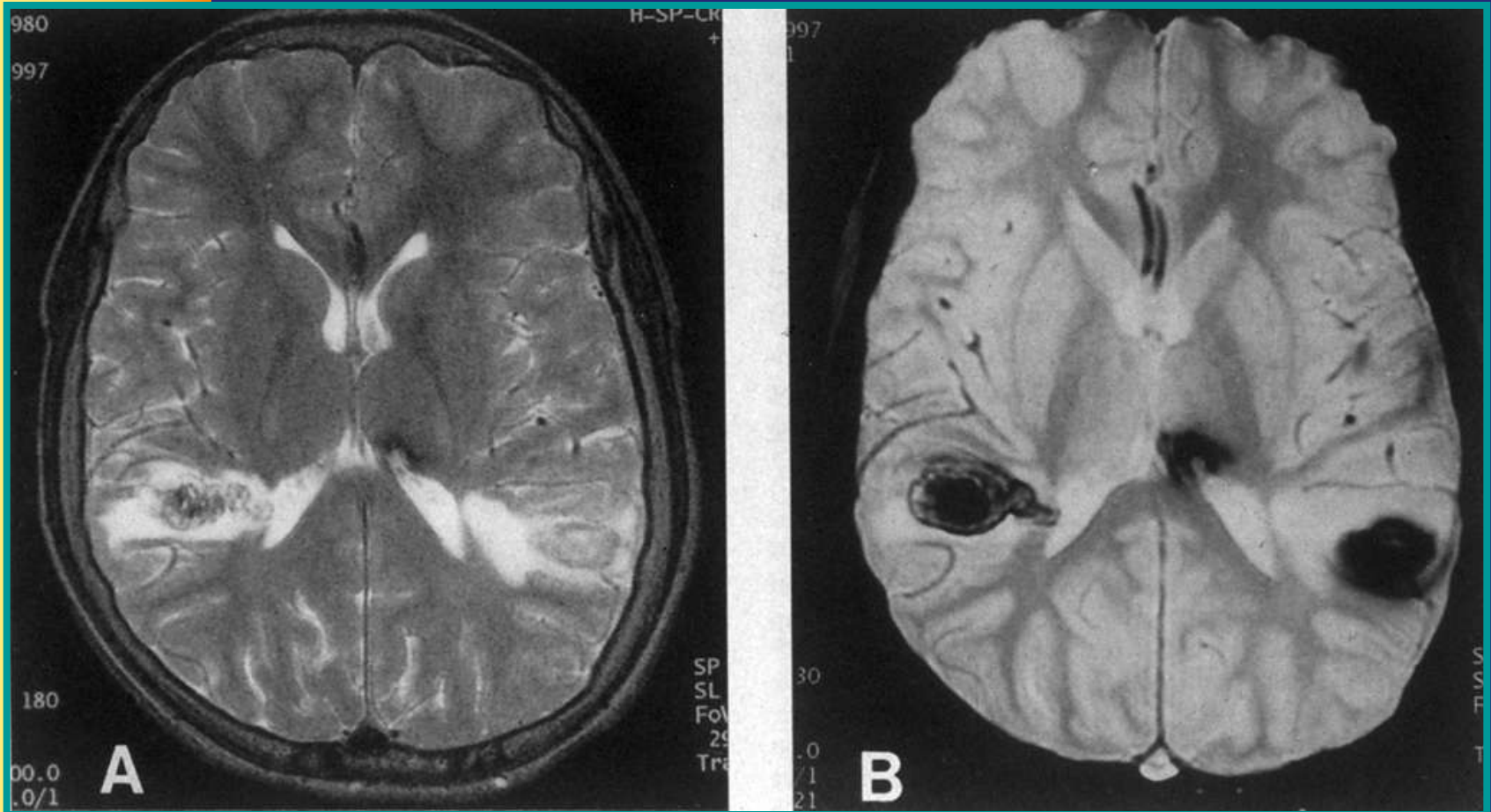
Artéfacts susceptibilité Mg :

air cellule mastoïdiennes (T2*)



Artéfacts susceptibilité Mg

Hémorragie hémossidérine NOIR EG T2*

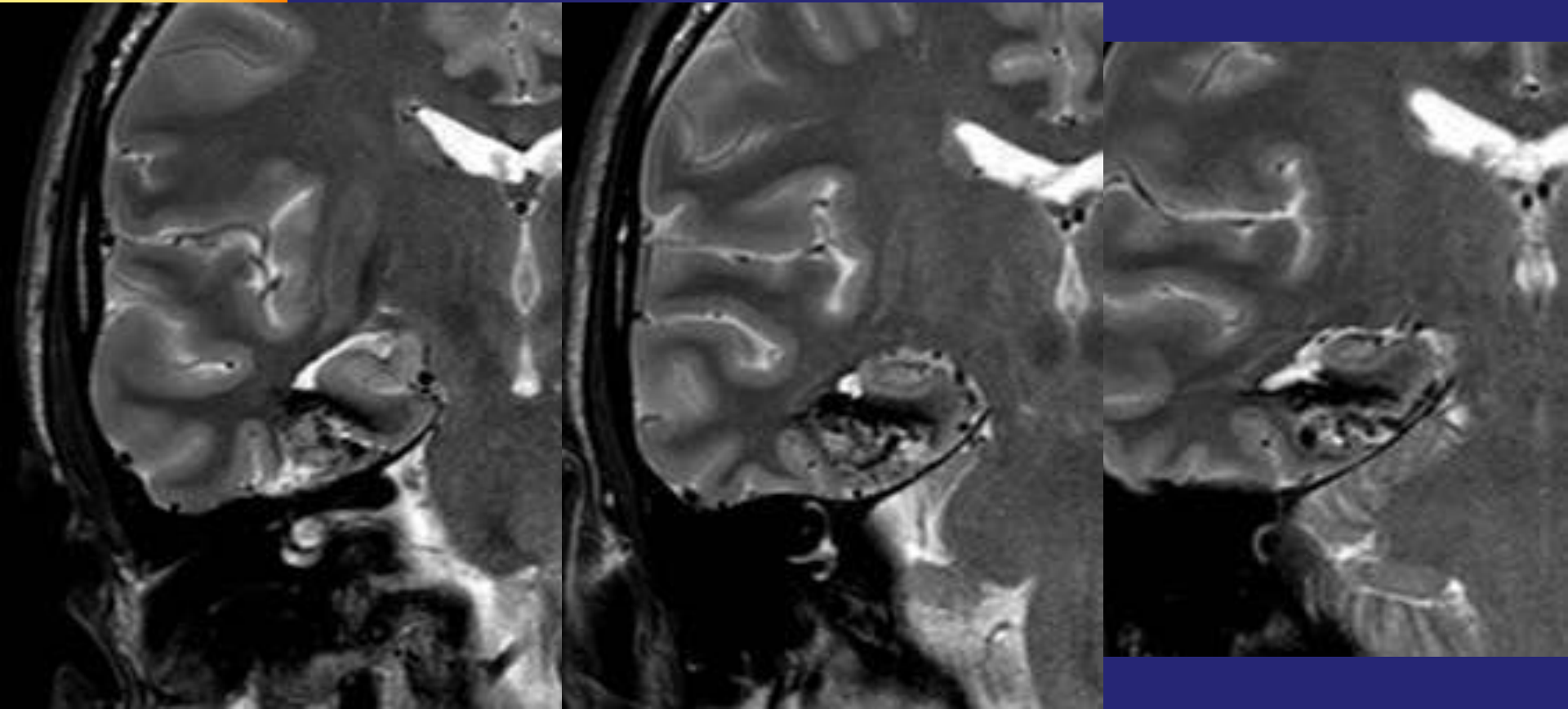


ESR T2

EG T2*

Malformation AV temporale

Flux circulant rapide noir flow void T2 TSE

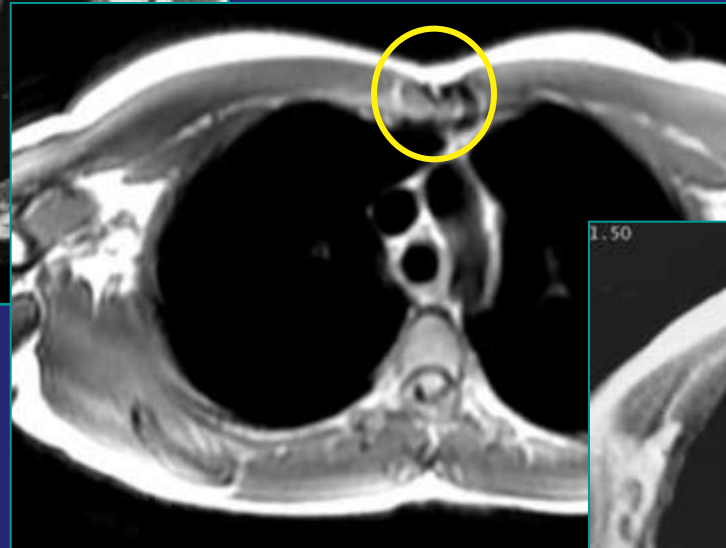


Artéfacts métalliques noir:

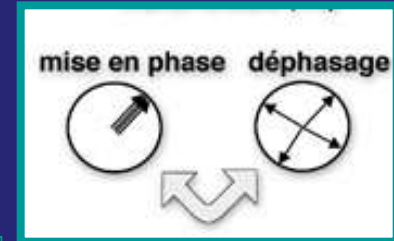
Fils de sternotomie



SE)

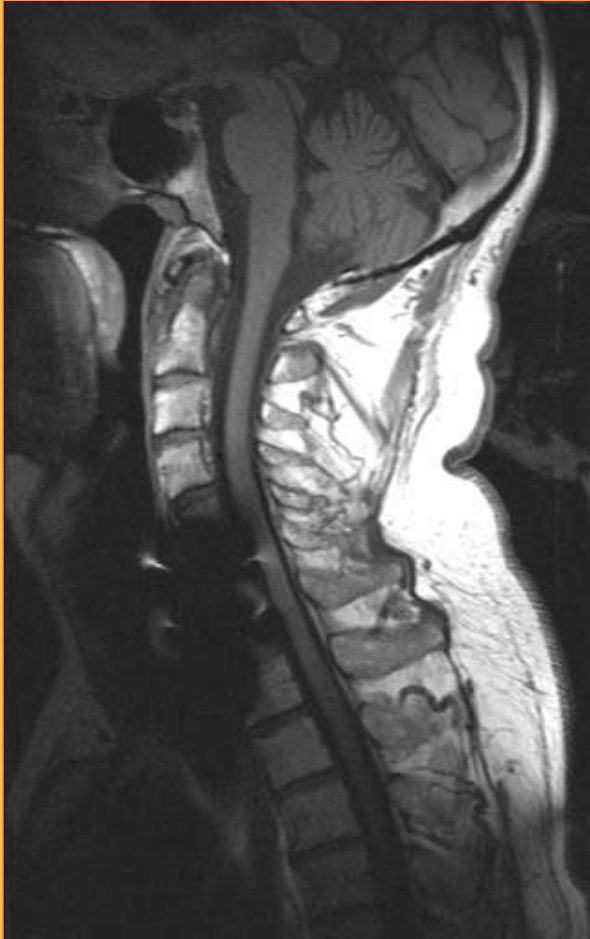


SER (x180°)



Echo de gradient (pas de 180°)

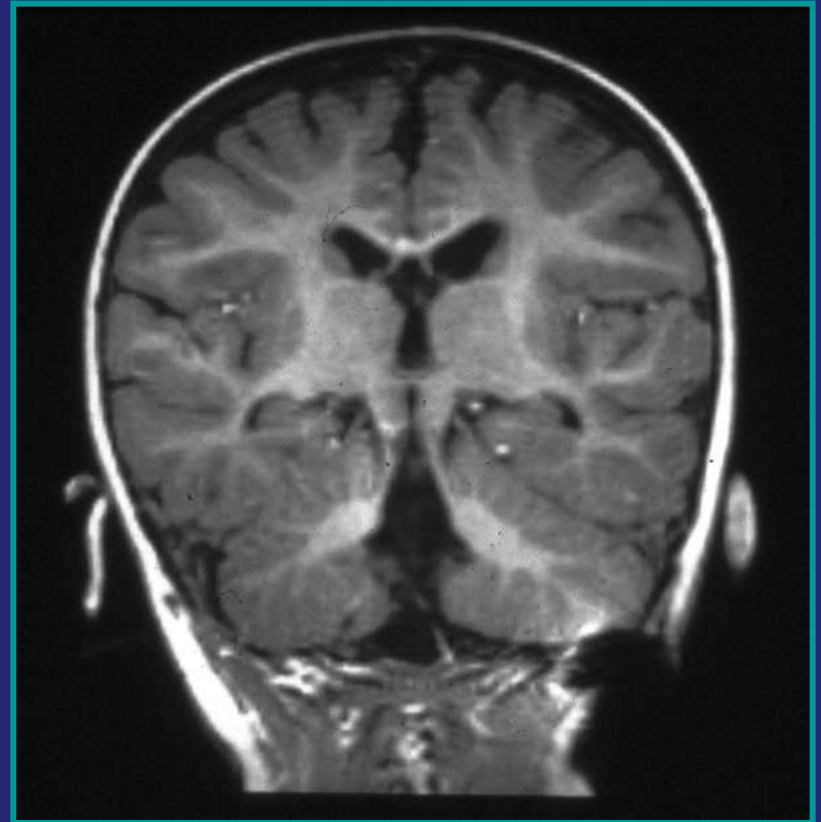
Artéfacts métalliques susceptibilité mg: noir



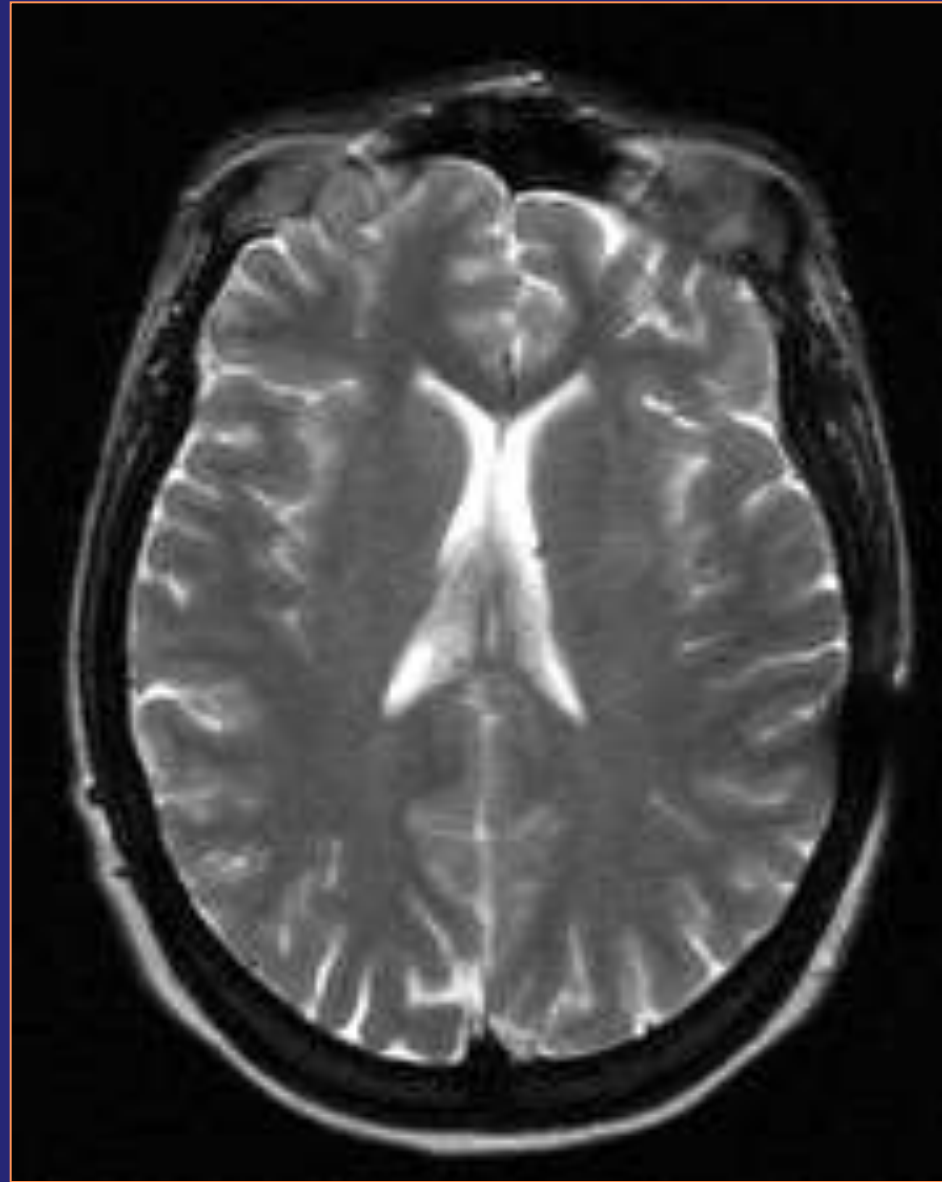
SE T₁



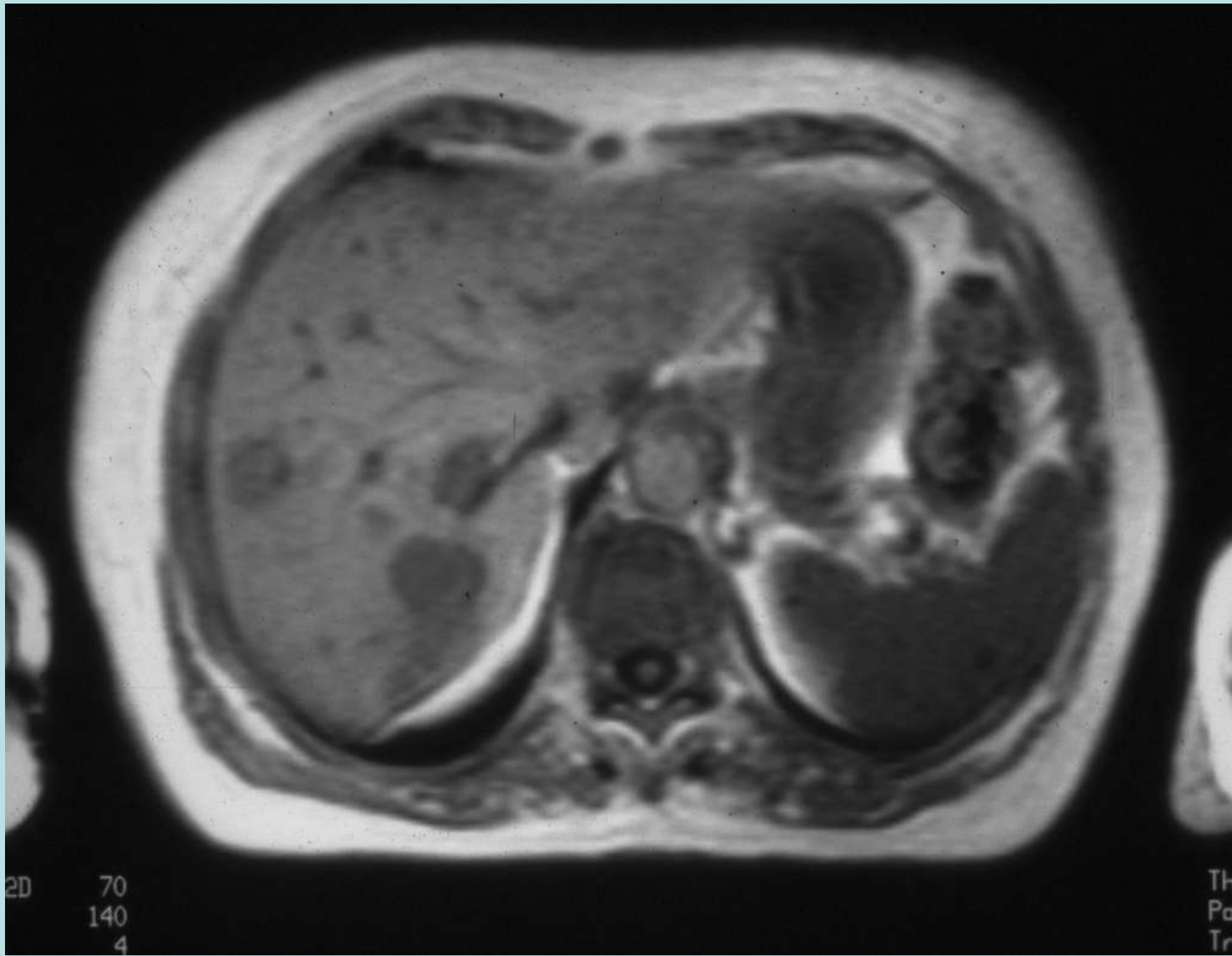
TSE T₂



T1



T2 (ESR) graisse +++

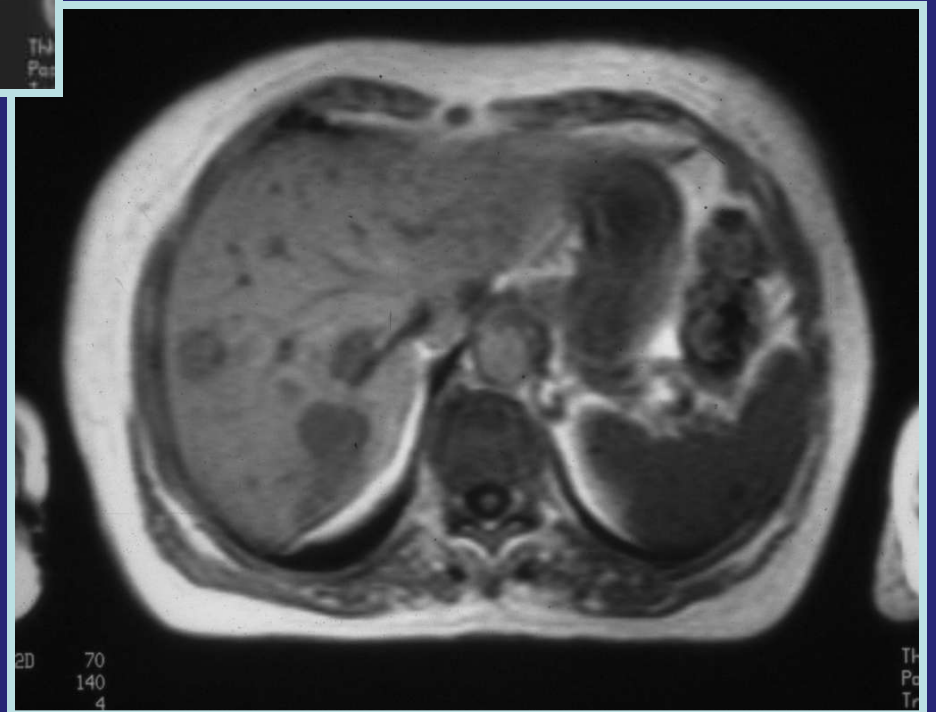
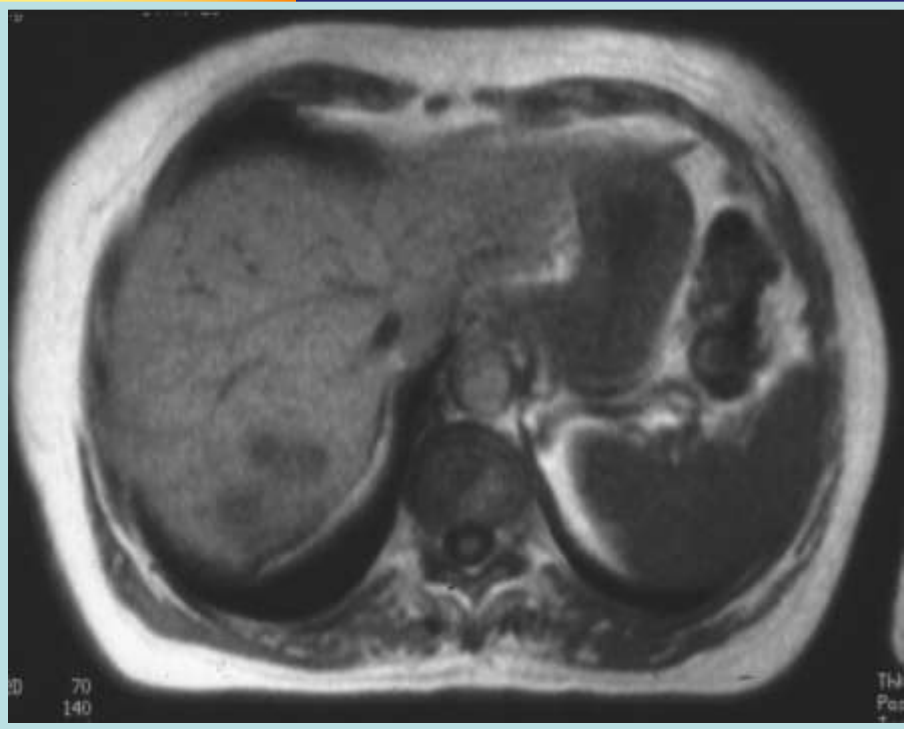


2D 70
140
4

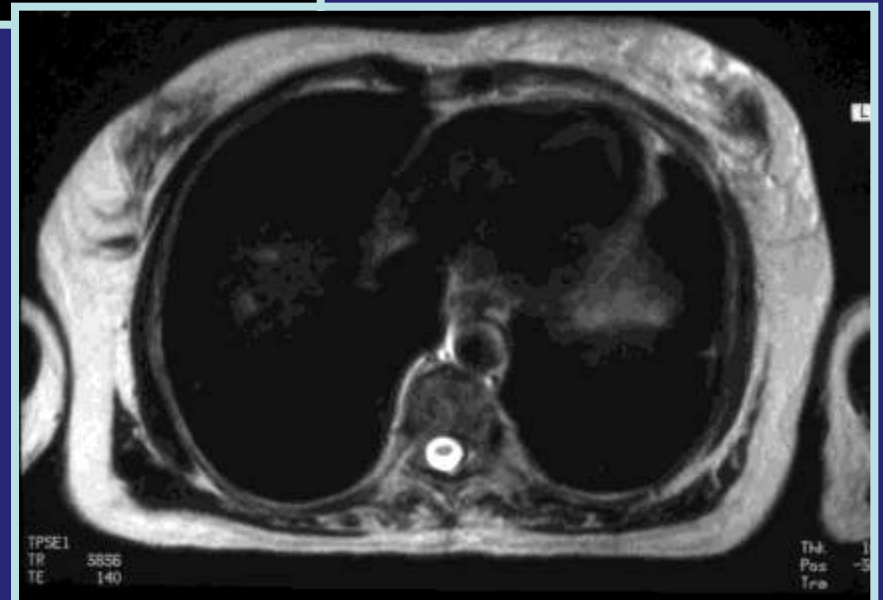
TH
Pa
Tr



Inversion G_0 et G_∞



Noir T1/Blanc +++ T2

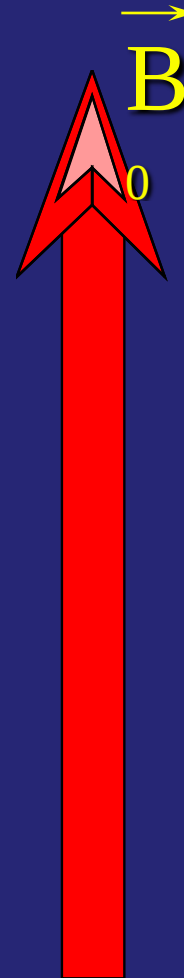


0,5 T



Tissu	T1 (ms)
Muscle	600
Foie	323
Rein	449
Rate	554
Graisse	215
Subst grise	656
Subst. blanche	539
LCR	2500
Poumon	600

1,5 T



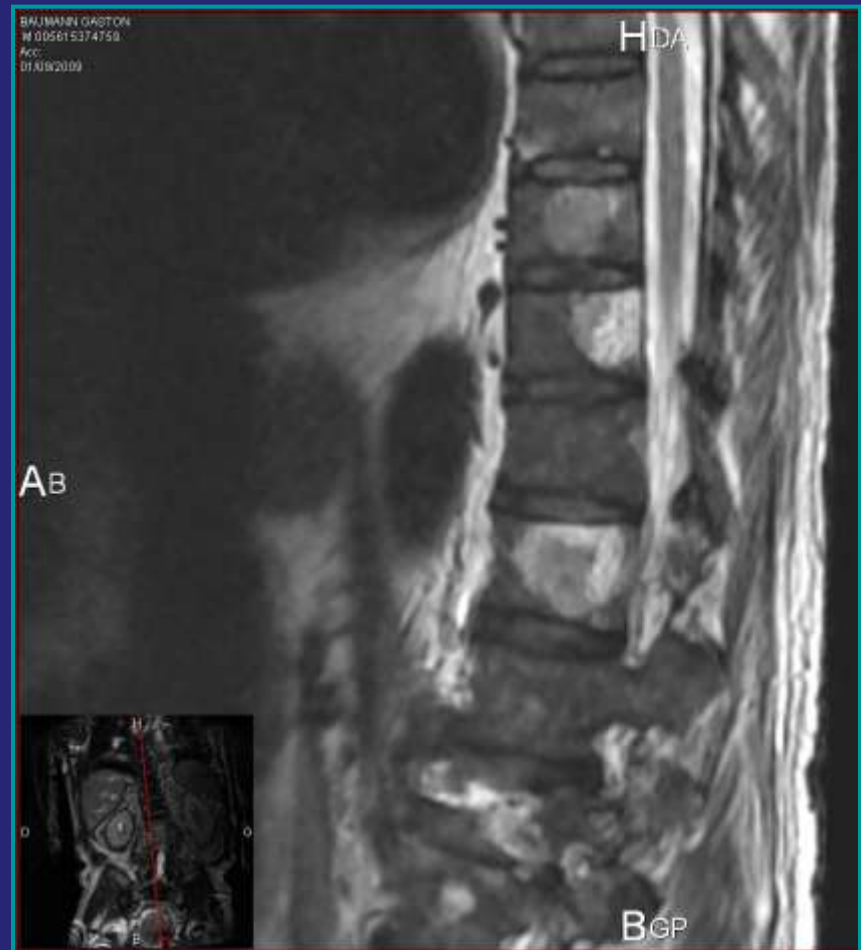
Tissu	T1 (ms)
Muscle	870
Foie	490
Rein	650
Rate	780
Graisse	260
Subst grise	920
Subst. blanche	790
LCR	3000
Poumon	830

Indépendant de
la valeur de B_0

Tissu	T2 (ms)
Muscle	47
Foie	43
Rein	58
Rate	62
Subst. Grise	85
Graisse	
85	
Subst. blanche	101
LCR	>200
Poumon	79

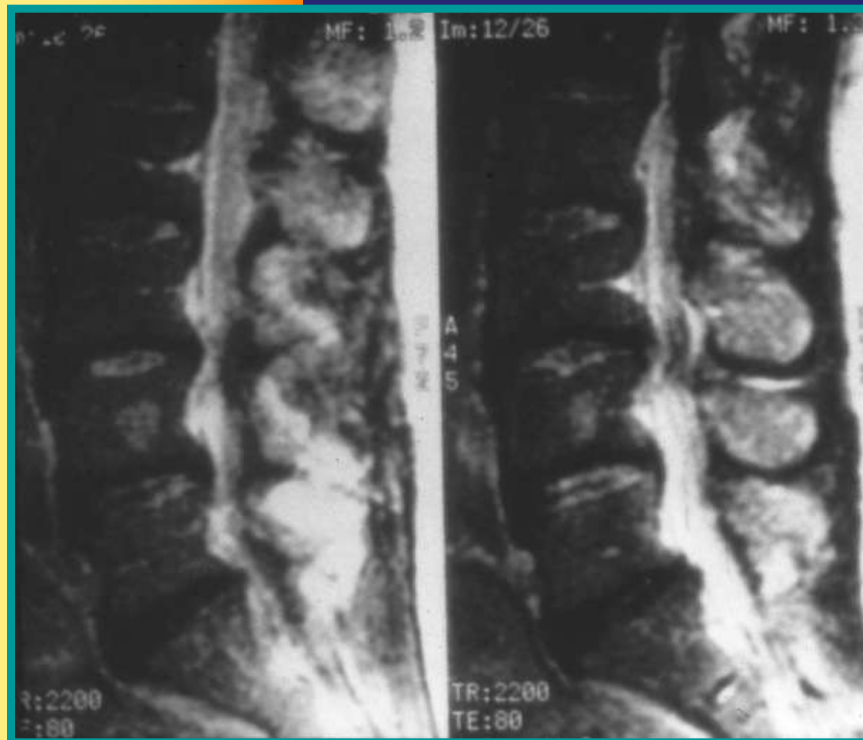


T1

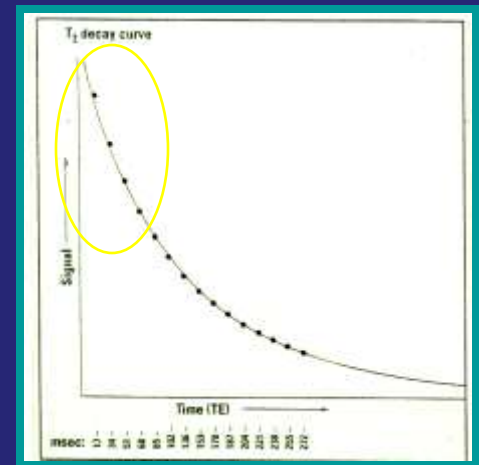
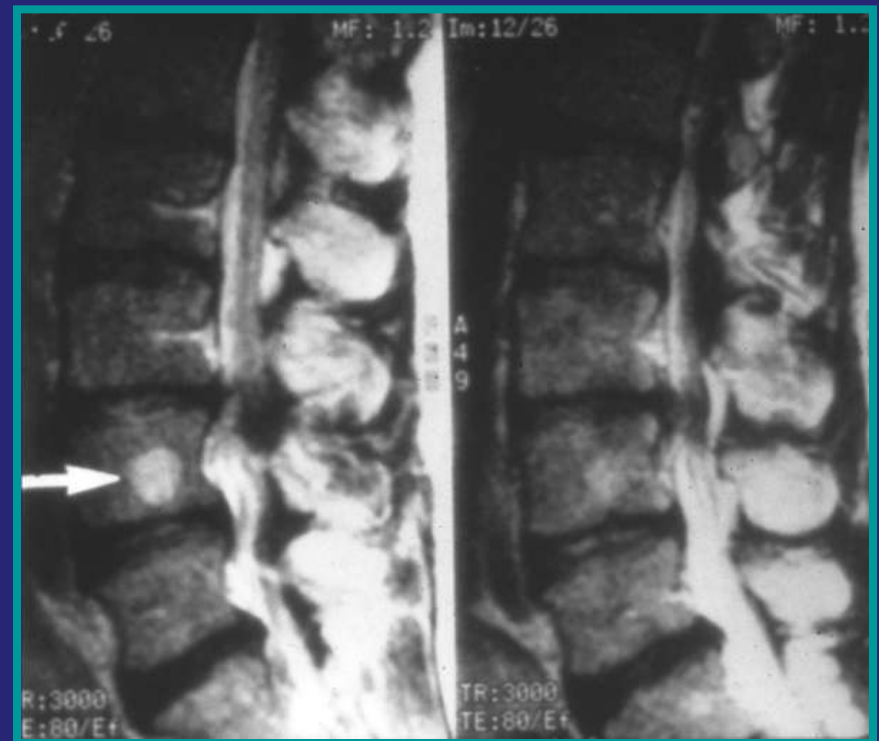


T2 ESR

SE

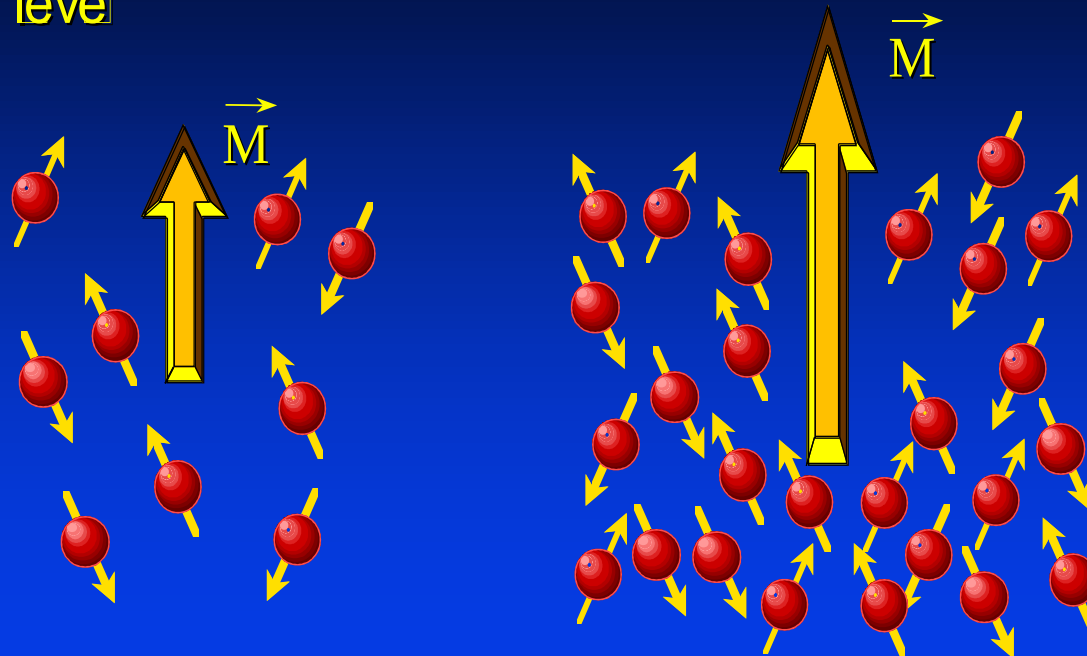


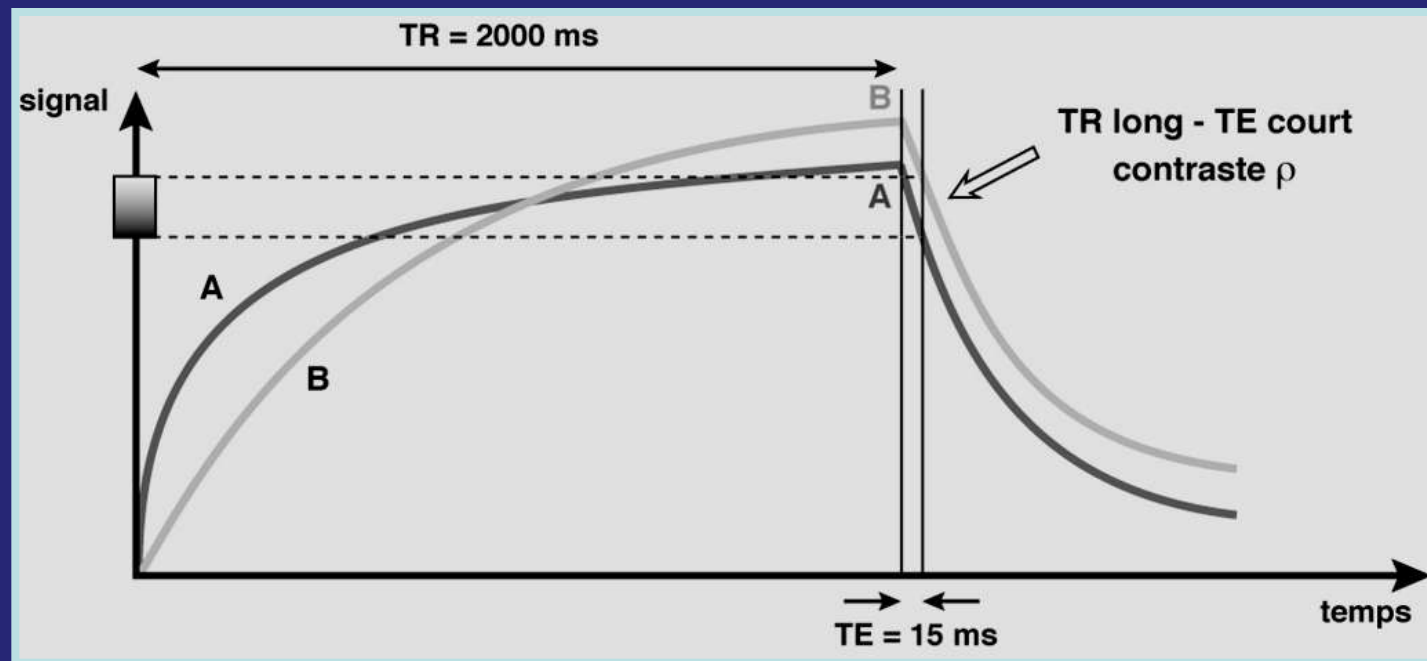
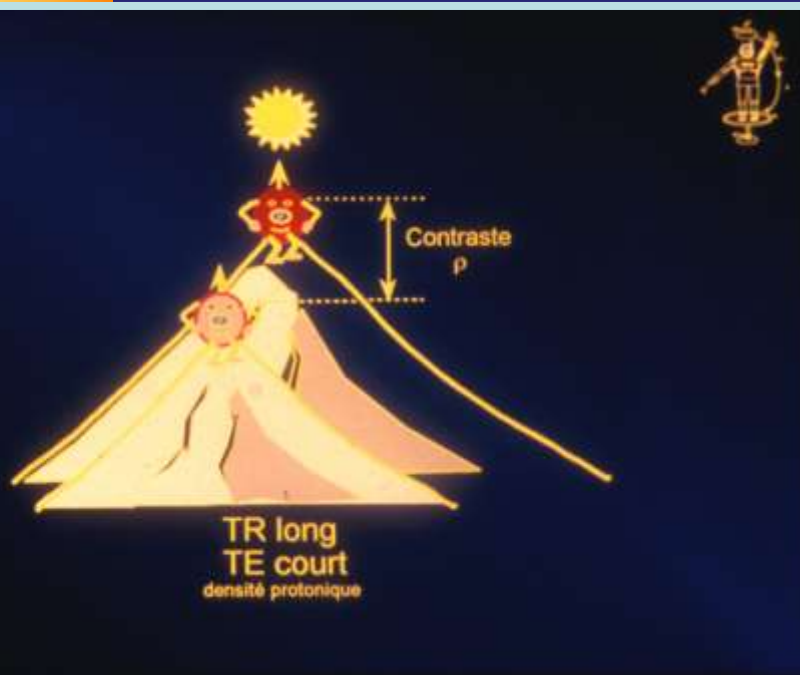
SER



PONDERATION EN DENSITE DE PROTONS

L'aimantation tissulaire ($\vec{M}$) est d'autant plus importante que la densité protonique est élevée





Un peu d'histoire

Le magnétisme
nucléaire

Action d'un champ
magnétique

Le phénomène de
résonance
magnétique

La relaxation

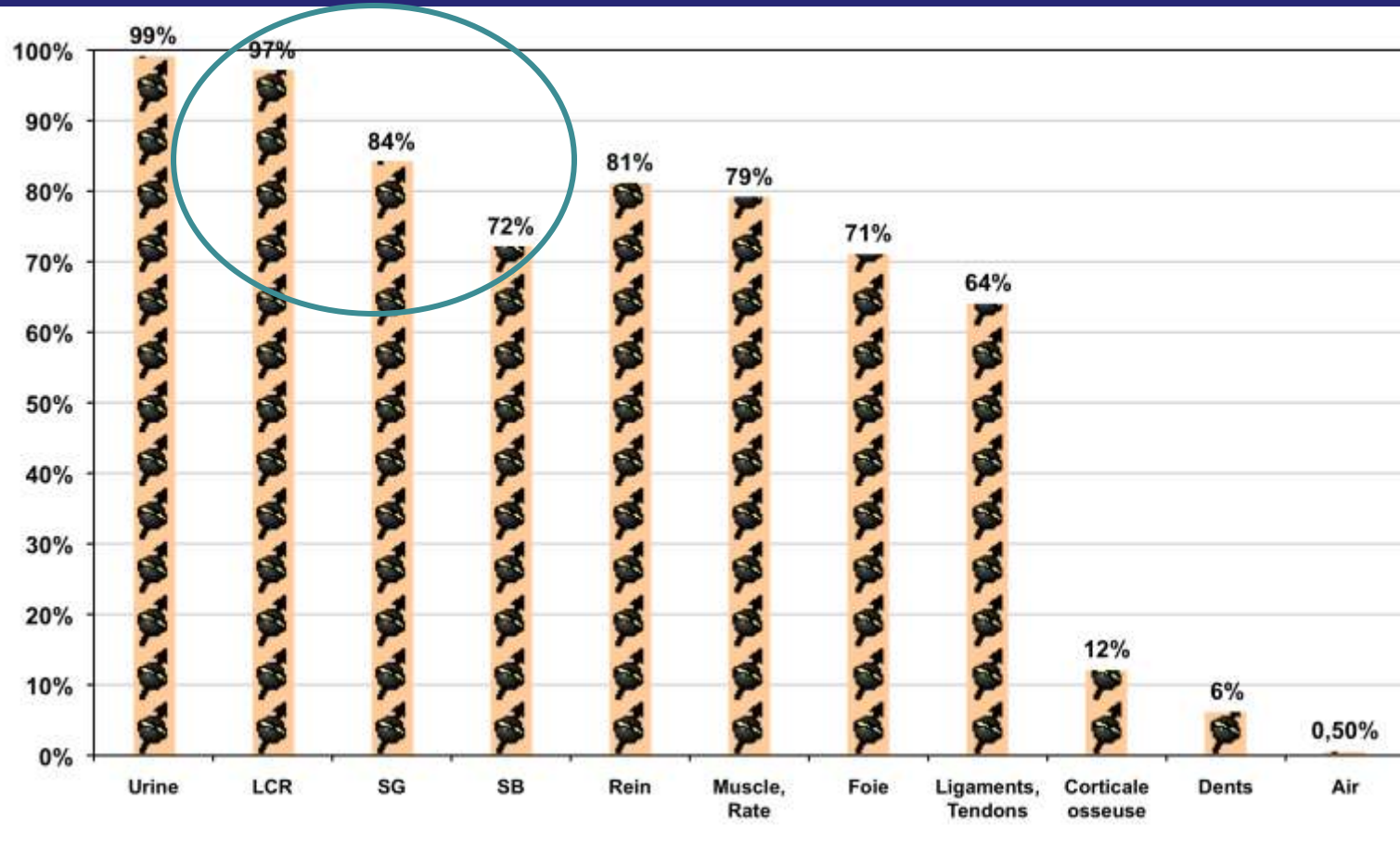
Le signal

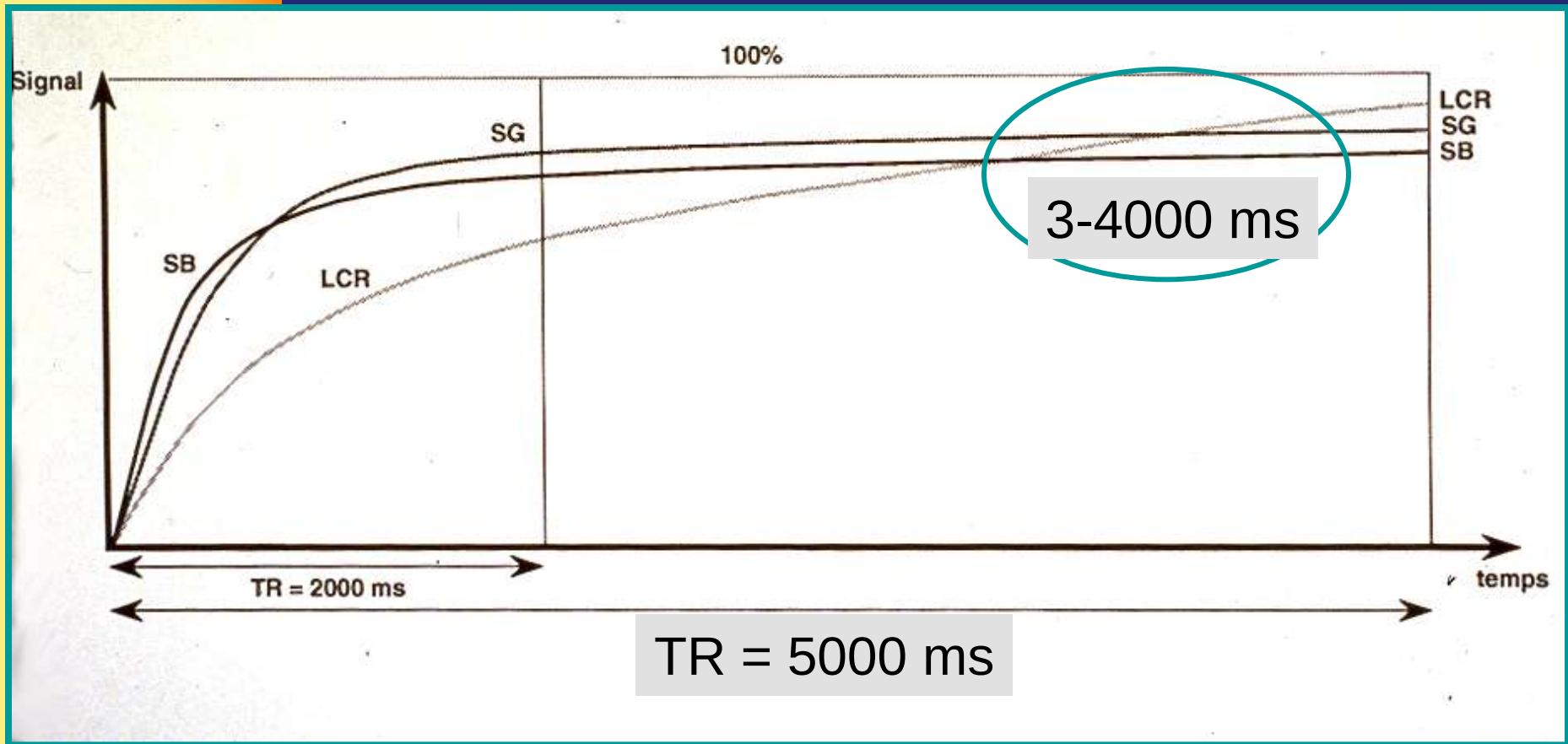
Principe de l'écho
de spin

Le contraste en T1,
T2 et densité
protonique

- Influence du TR
- Influence du TE
- Pondération en T1
- Pondération en ρ
- Pondération en T2

La teneur en eau de différents **tissus biologiques** permet d'évaluer leurs différences en **densité de protons** :



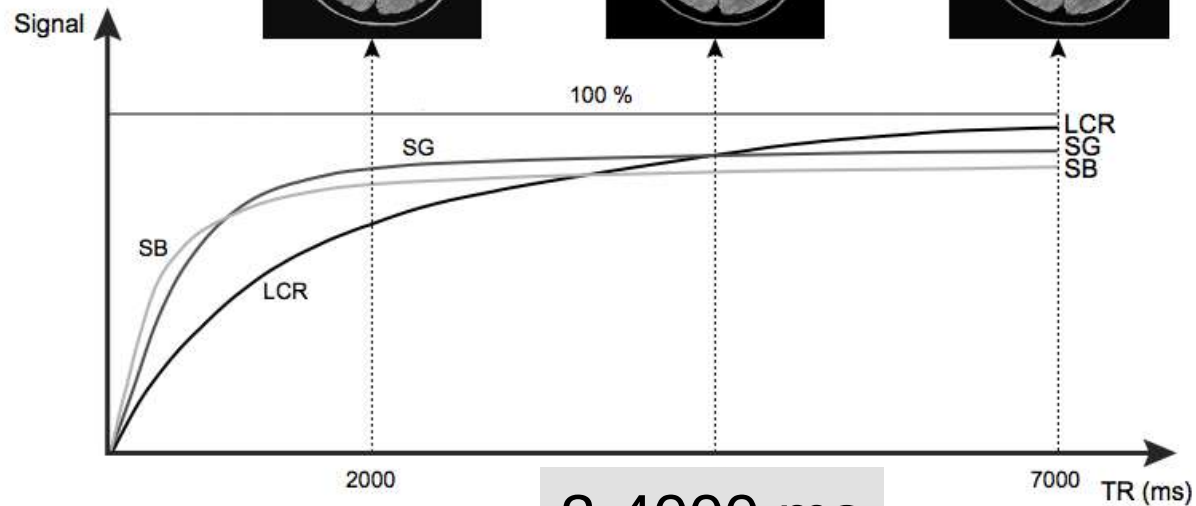


CONTRASTE / TR

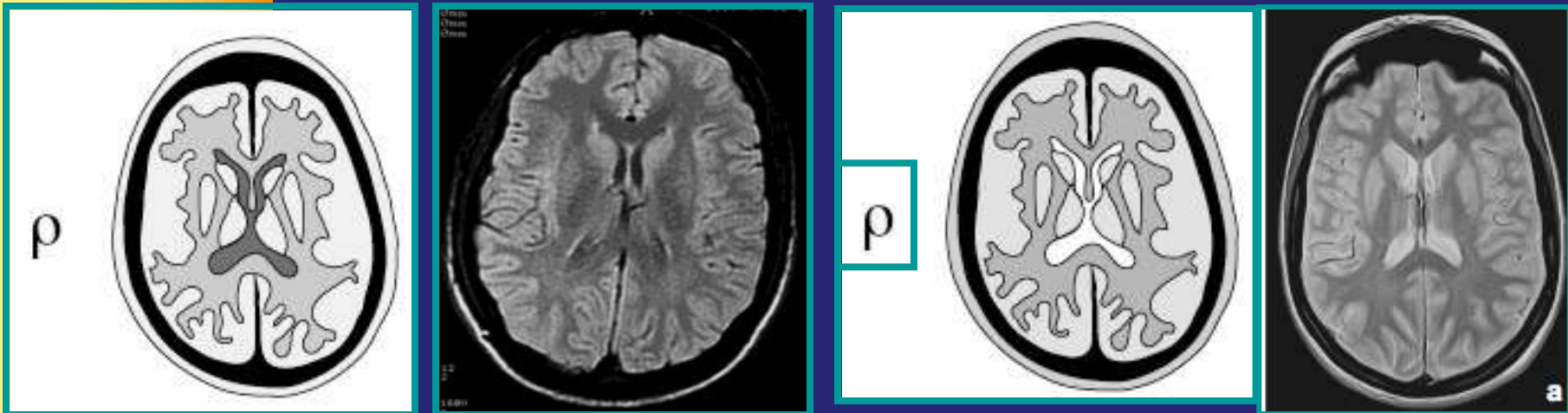
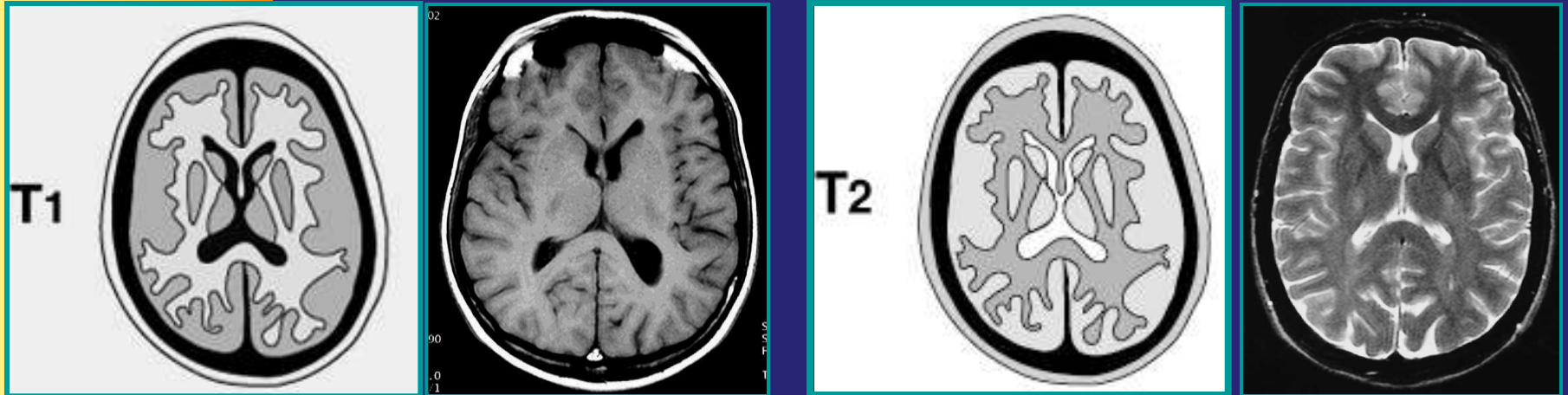
$\rho : SE$



$\rho : SER$



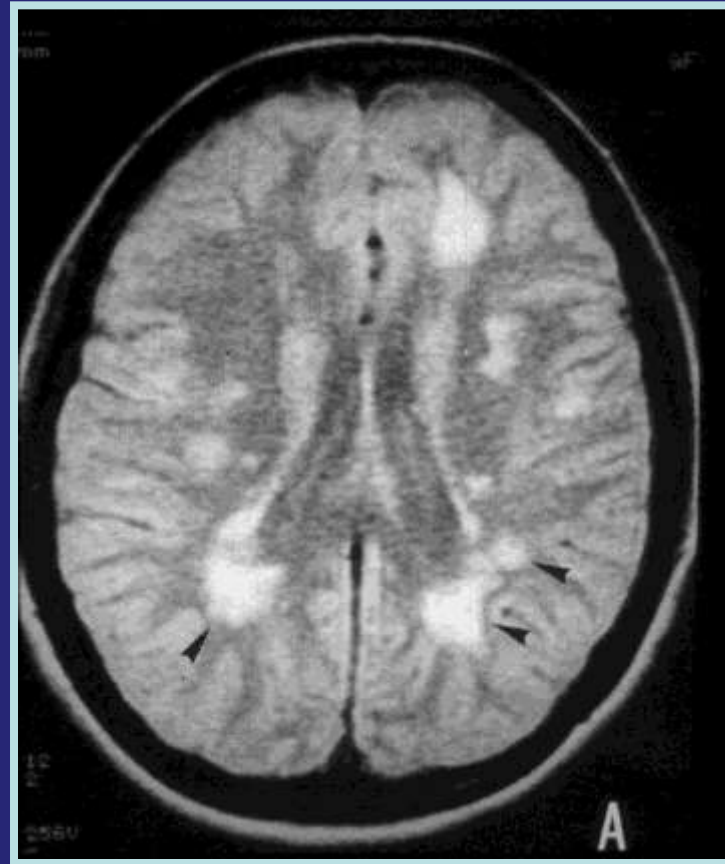
CONTRASTE EN IRM SE/SER



ES (ρ TR 2s)

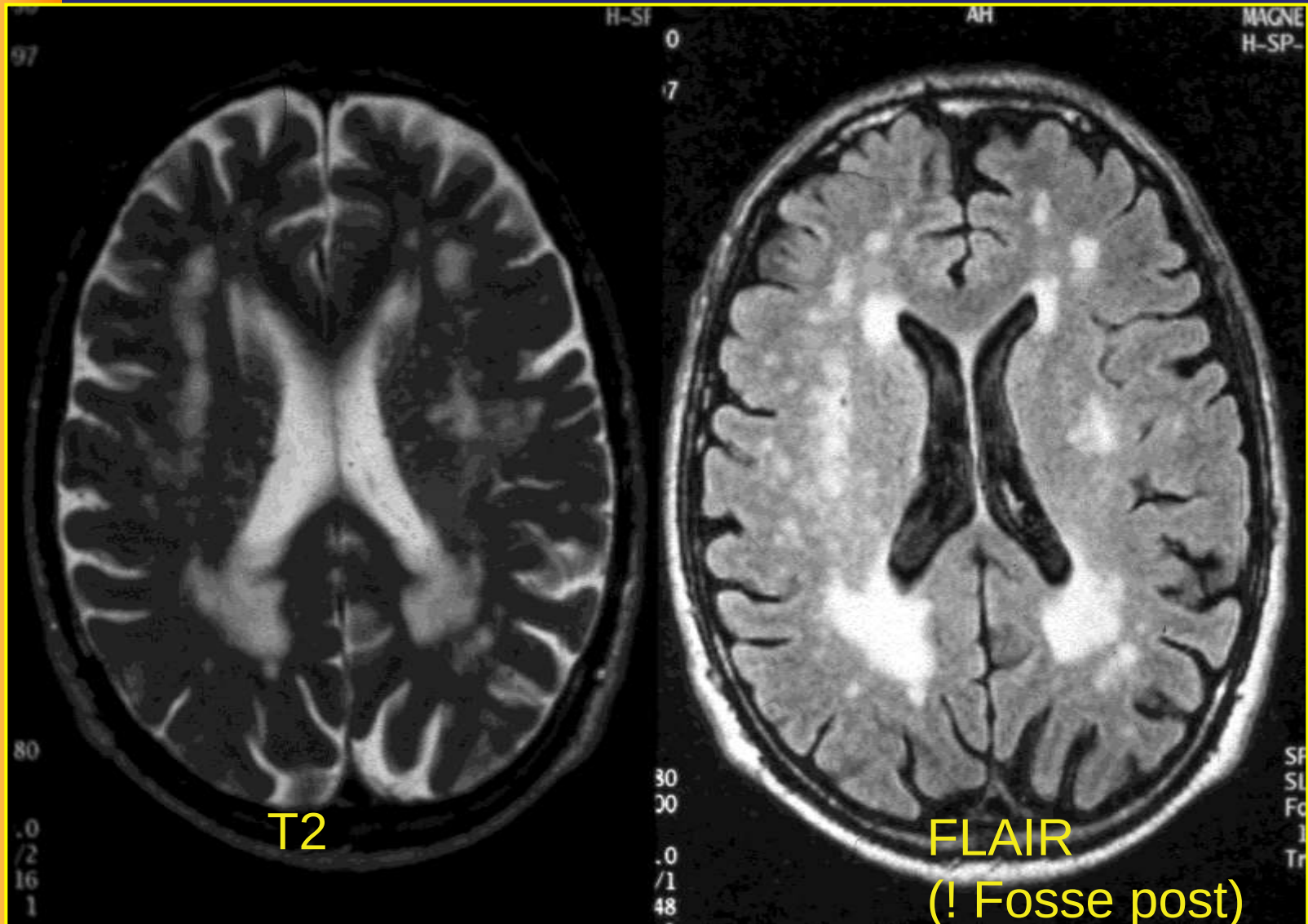
ESR (ρ vrai TR 3,5-4s)

SEQUENCE rho HS périV.

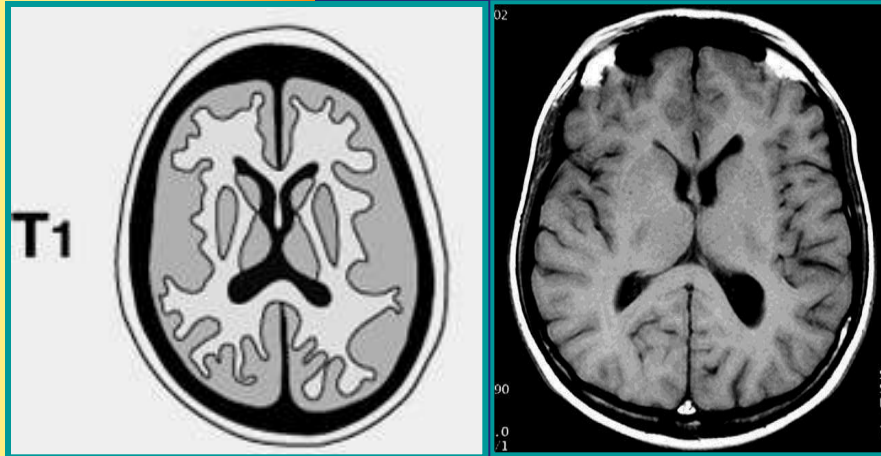


FLAIR !

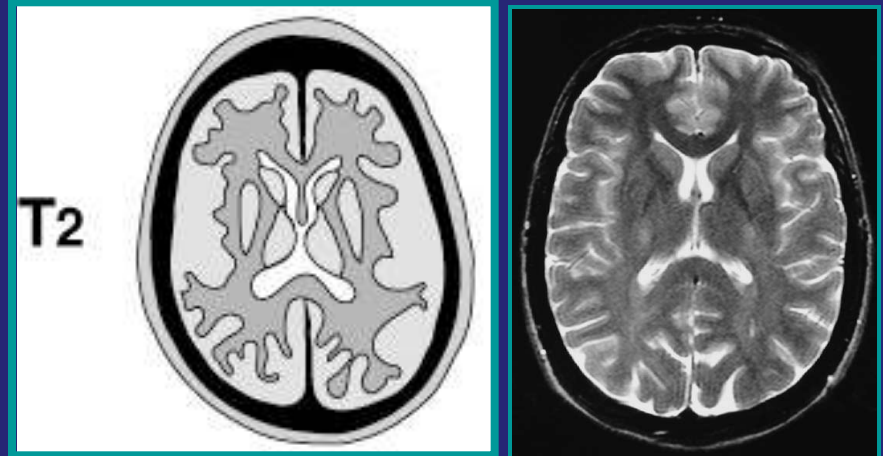
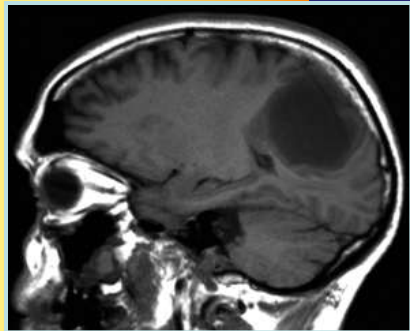
SEQUENCE FLAIR HS périV.



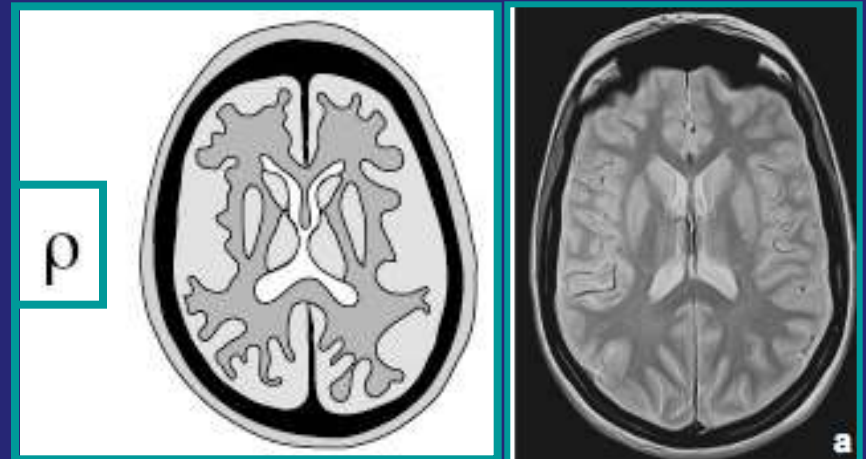
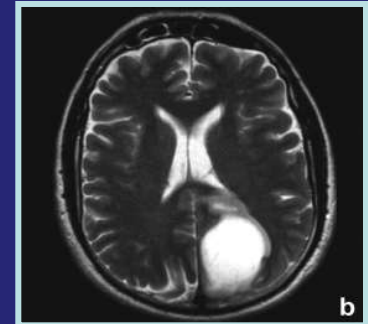
CONTRASTE EN IRM



Anatomique



Inversé



Un peu d'histoire

Le magnétisme
nucléaire

Action d'un champ
magnétique

Le phénomène de
résonance
magnétique

La relaxation

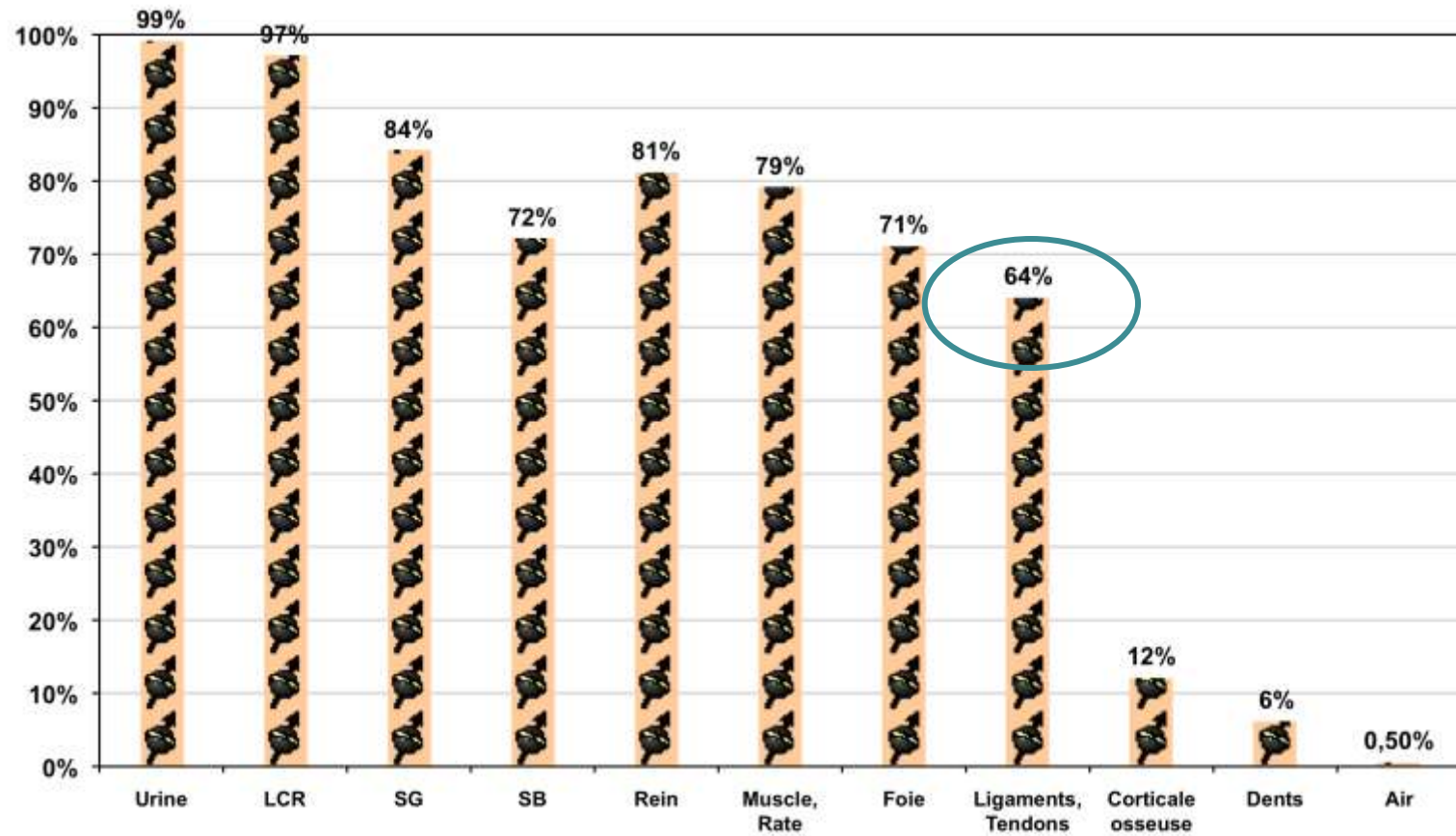
Le signal

Principe de l'écho
de spin

Le contraste en T1,
T2 et densité
protonique

- Influence du TR
- Influence du TE
- Pondération en T1
- Pondération en ρ
- Pondération en T2

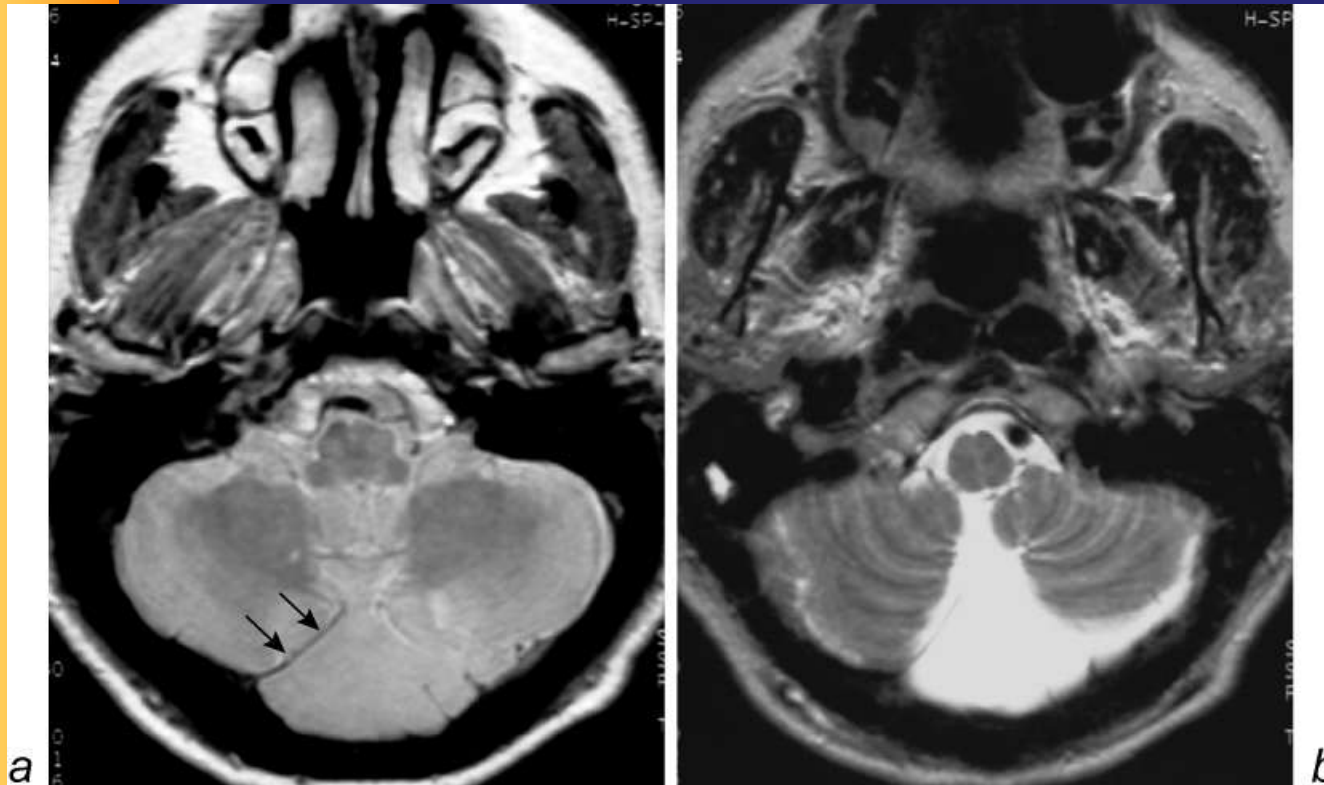
La teneur en eau de différents **tissus biologiques** permet d'évaluer leurs différences en **densité de protons** :



Tendons, ligament



dure-mère : kystes
arachnoïdiens
communiquants.



rho !

T₂ !

Un peu d'histoire

Le magnétisme nucléaire

Action d'un champ magnétique

Le phénomène de résonance magnétique

La relaxation

Le signal

Principe de l'écho de spin

Le contraste en T1, T2 et densité protonique

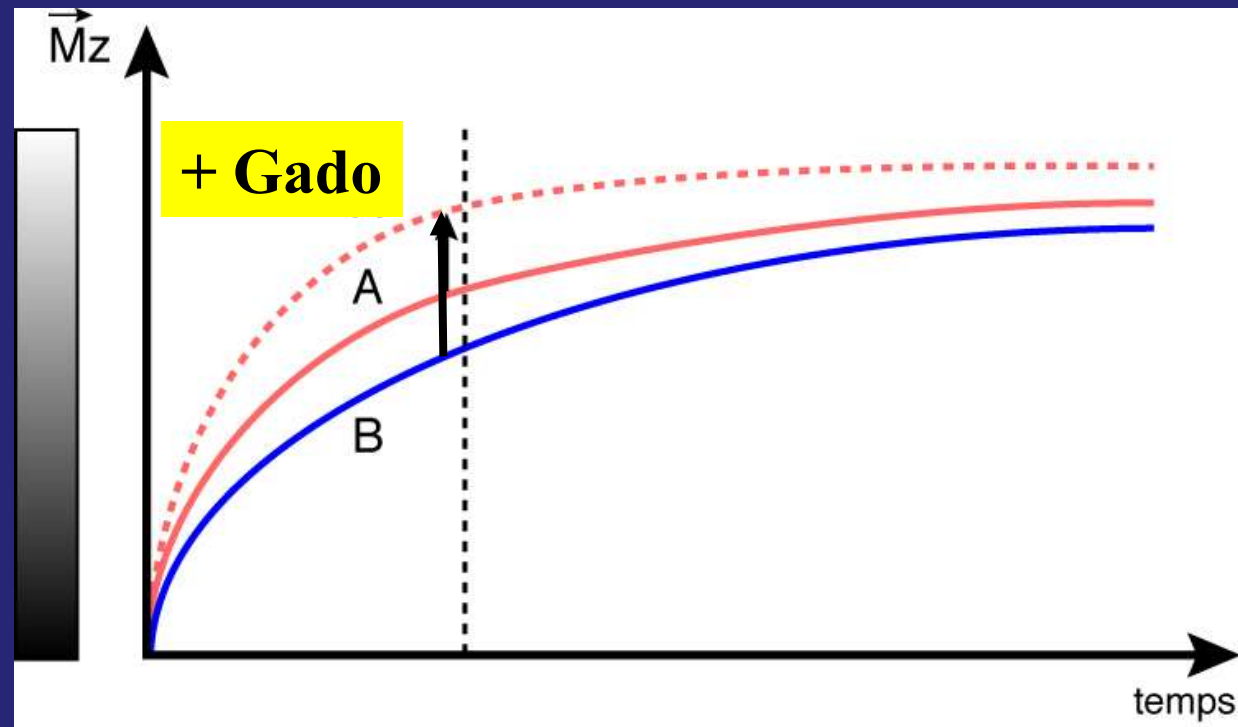
- Les produits de contraste

Mise en place des événements d'une séquence

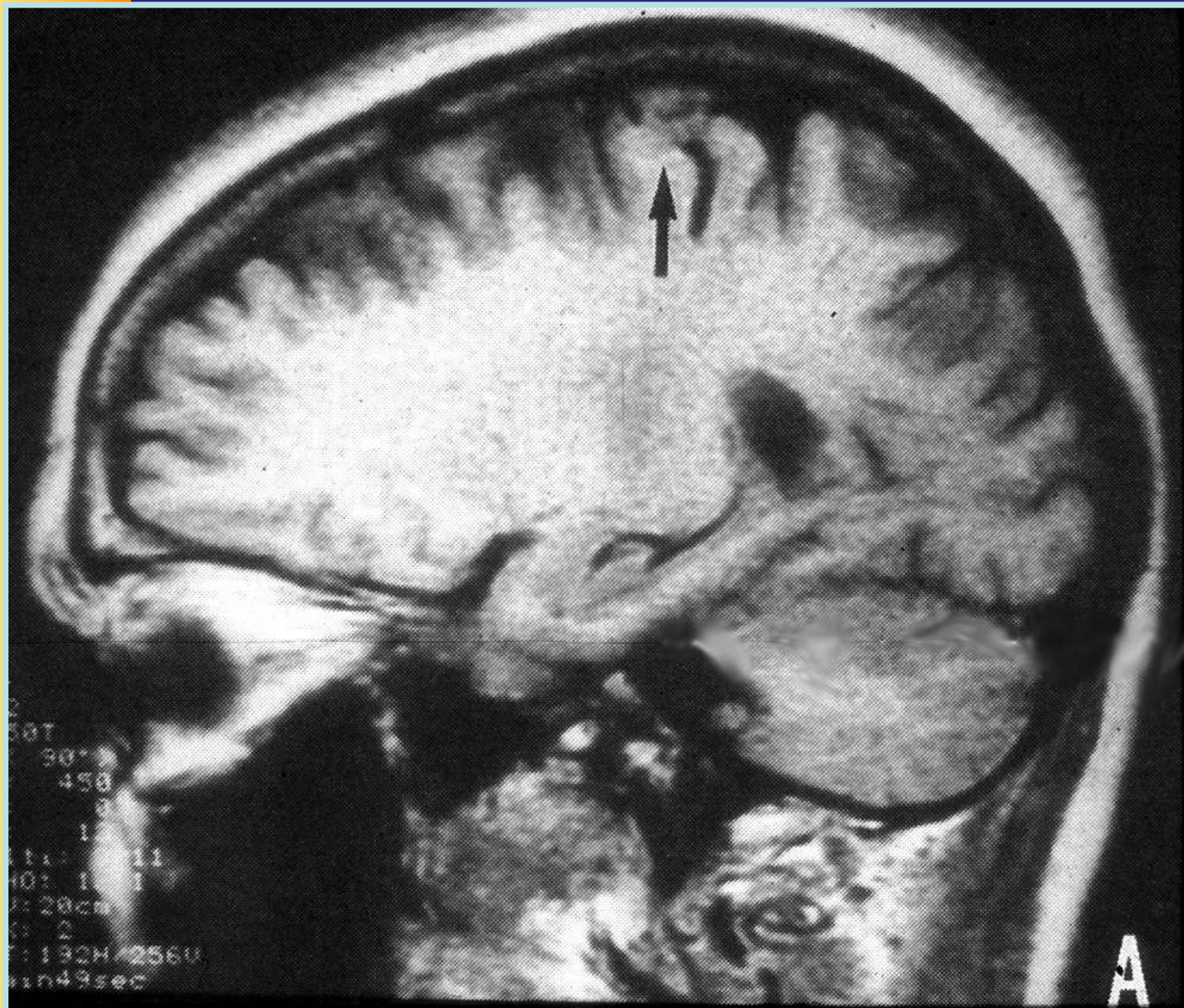
Produit de contraste: agents T1

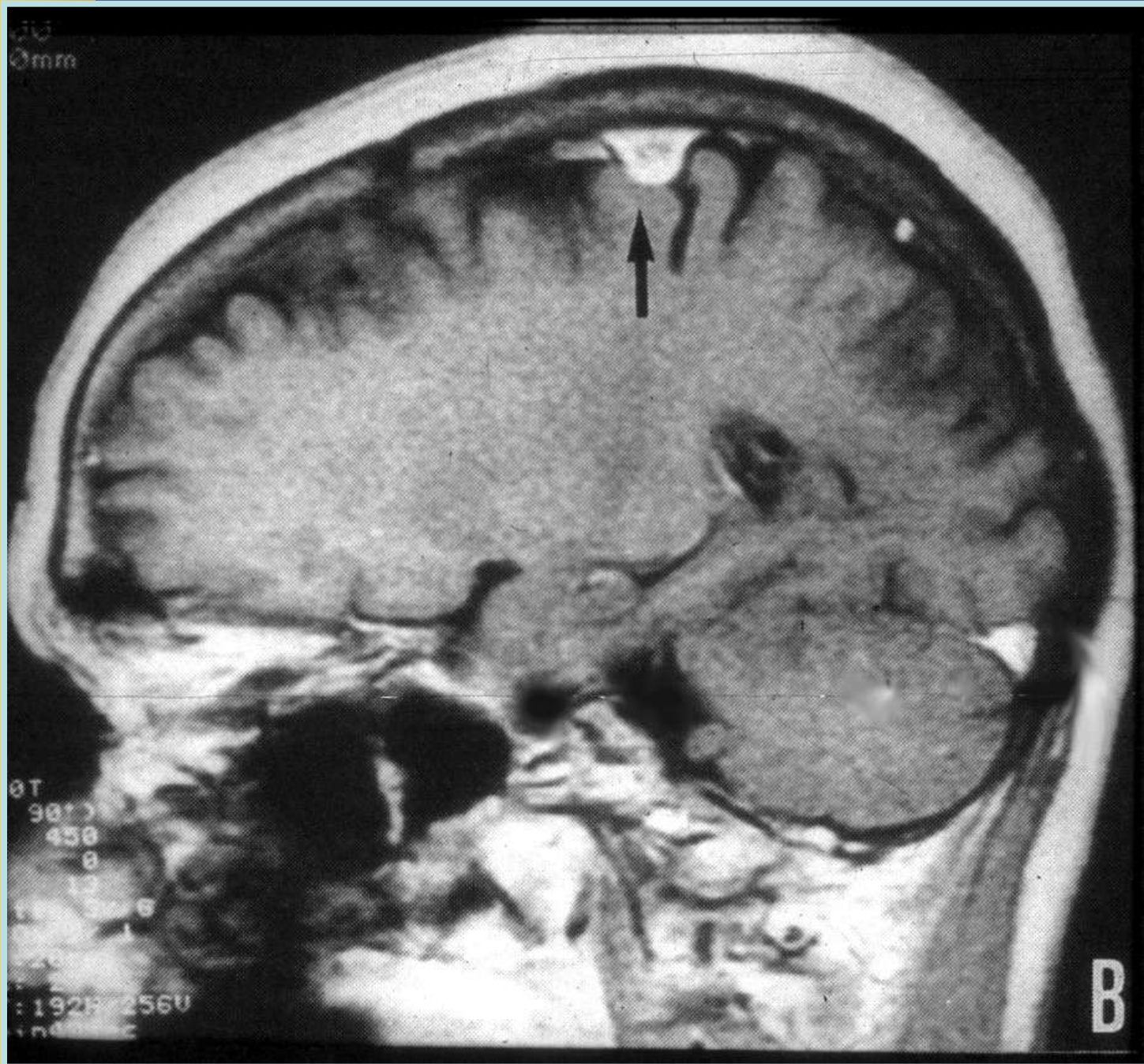
• Effet T1 (et T2)

Les agents de contraste vont agir sur les temps de relaxation : ils **raccourcissent le T1** et le T2.



Effet T1





Troubles visuels d'apparition progressive

T1 sans gd

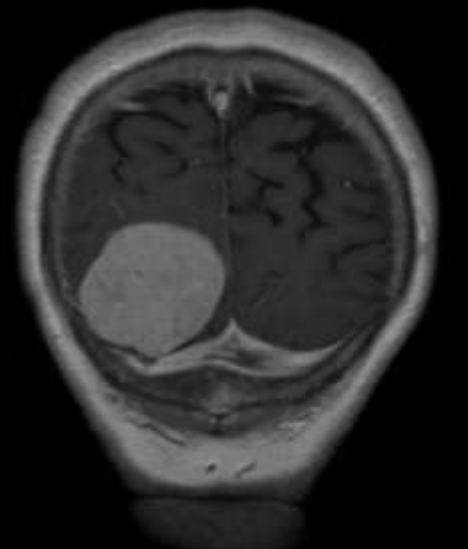
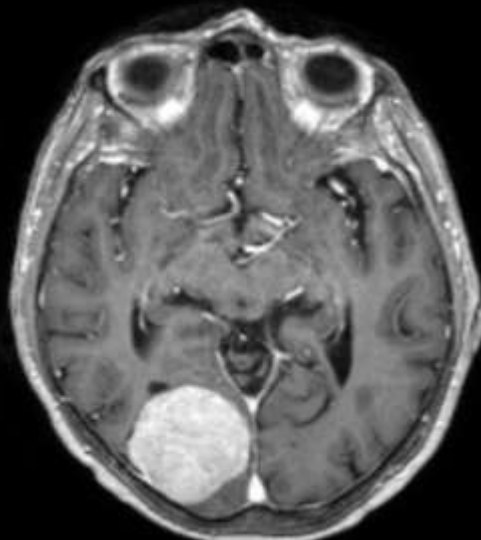
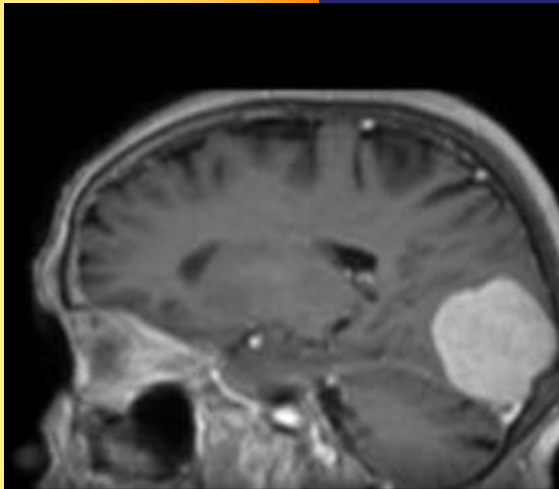
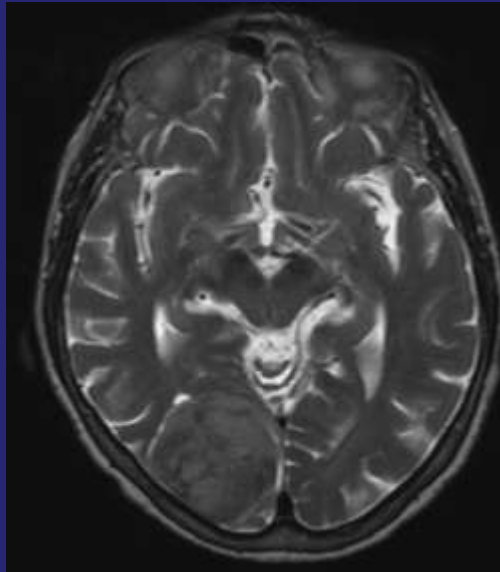
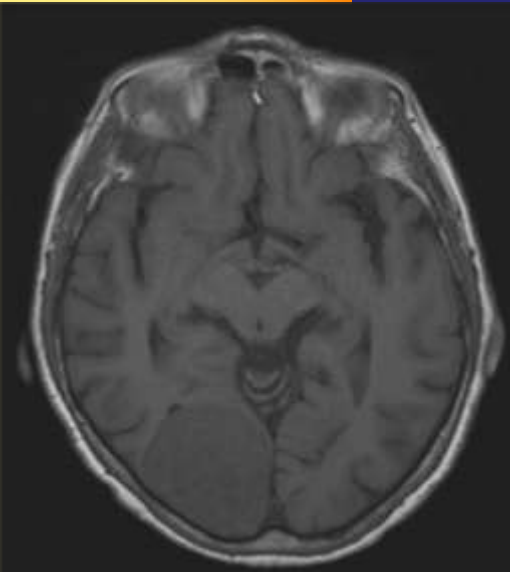
T2

Méningiome

Iso T1, Iso Hétérog. T2

Pdc GD +++

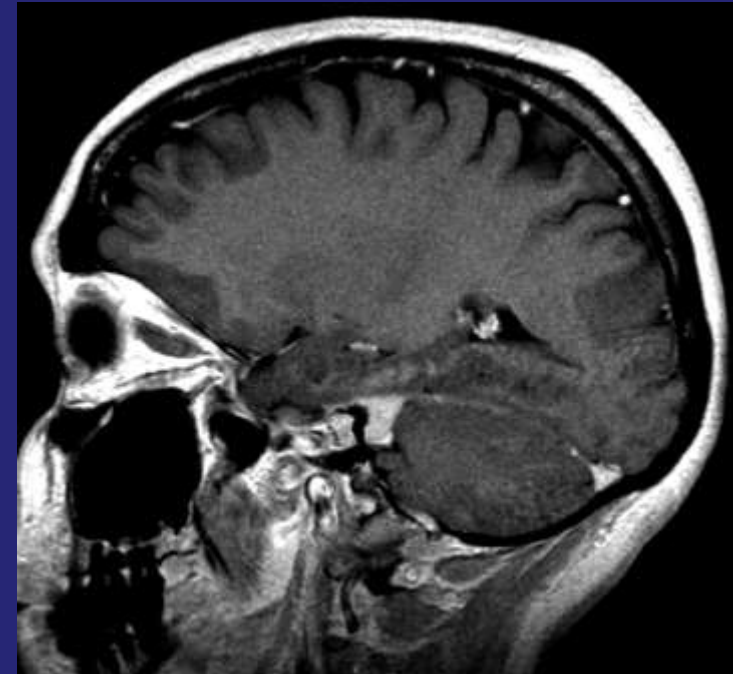
3D EG



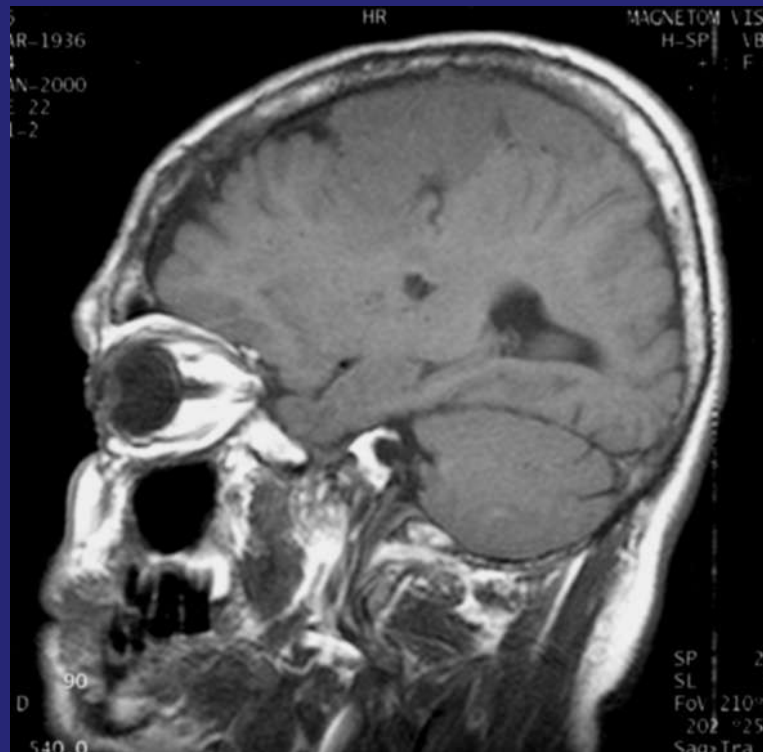
- Méningiome de l'angle ponto-cérébelleux G



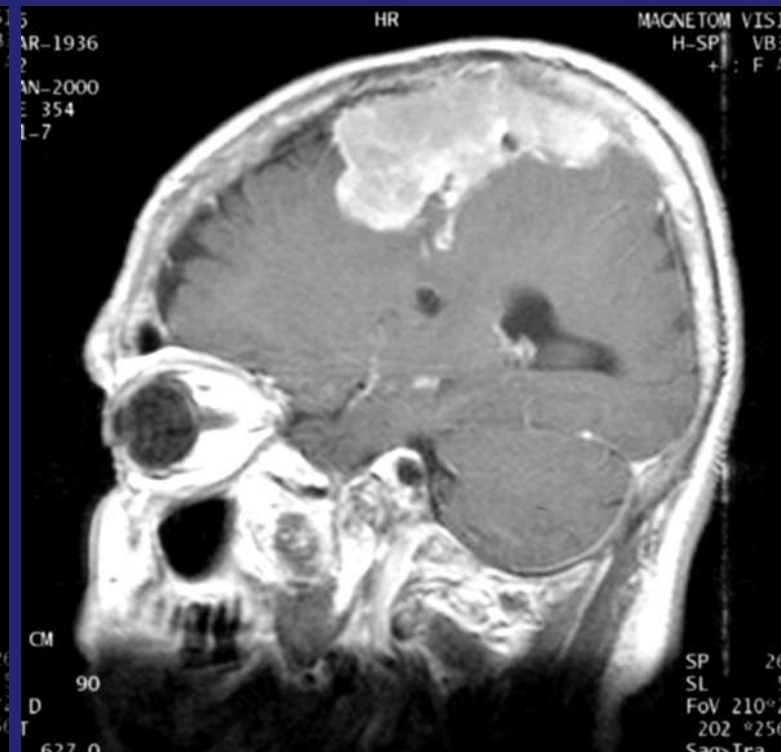
ESR T₁



ESR T₁ + Gd

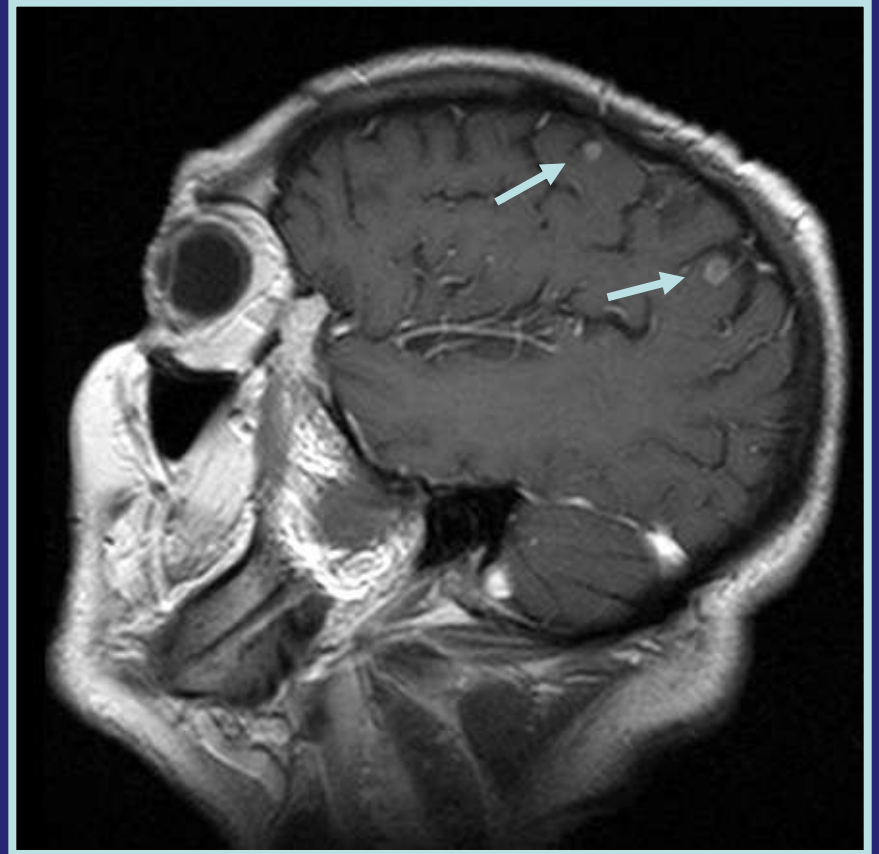
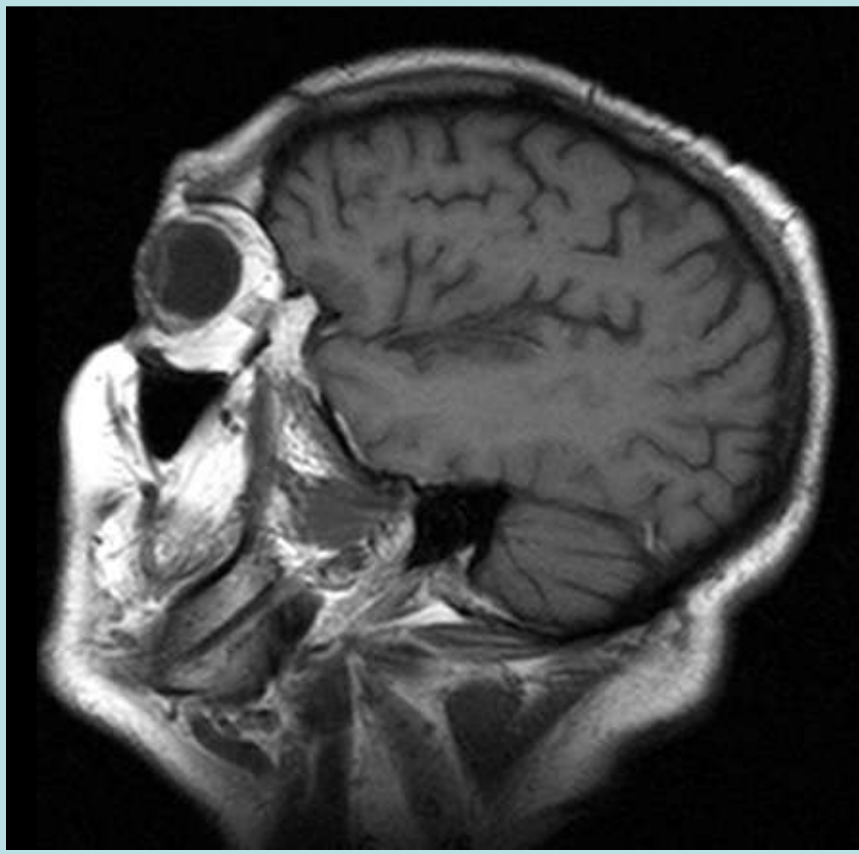


SE T₁



SE T₁ + Gd

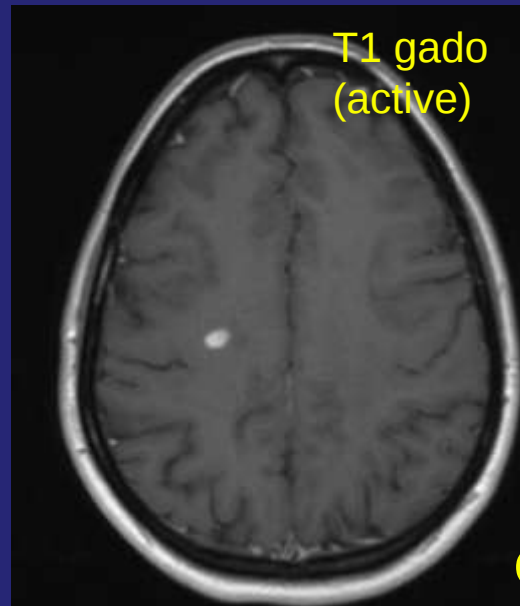
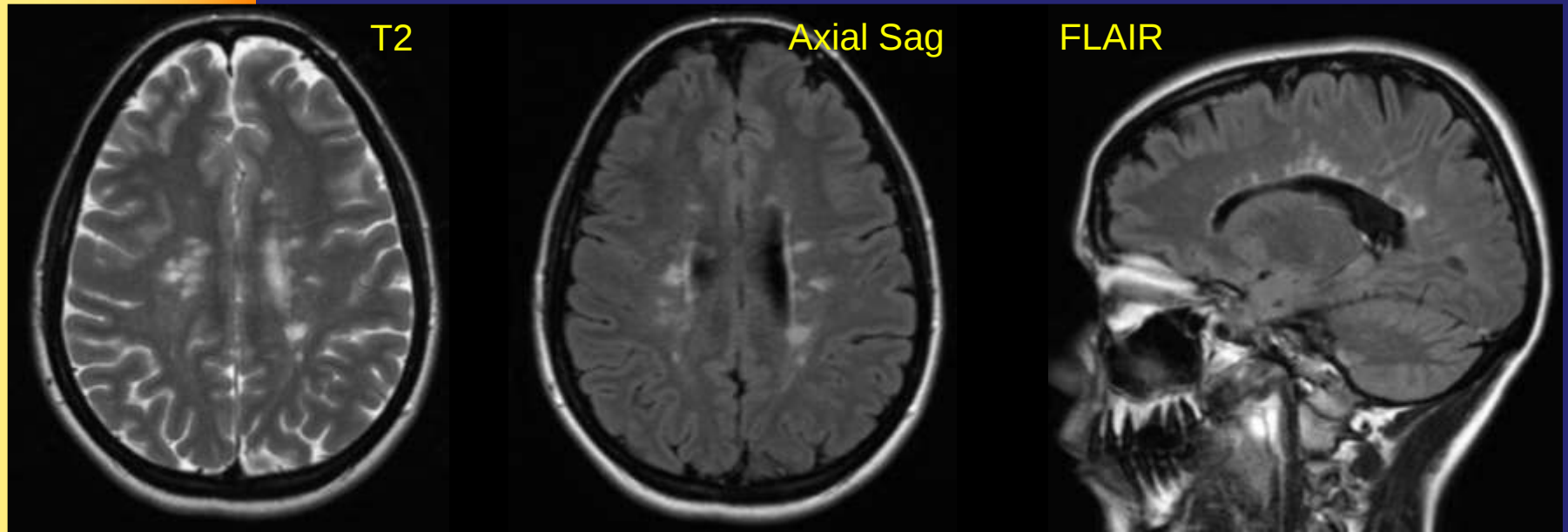
- Néo poumon IRM bilan





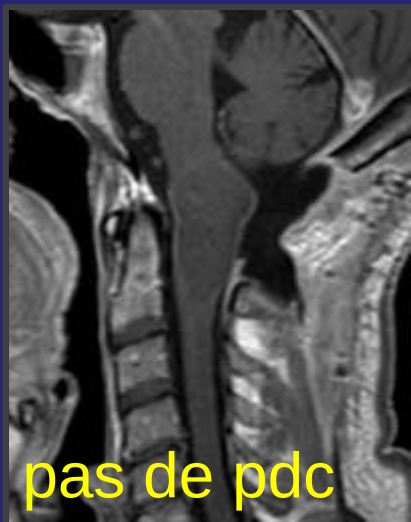
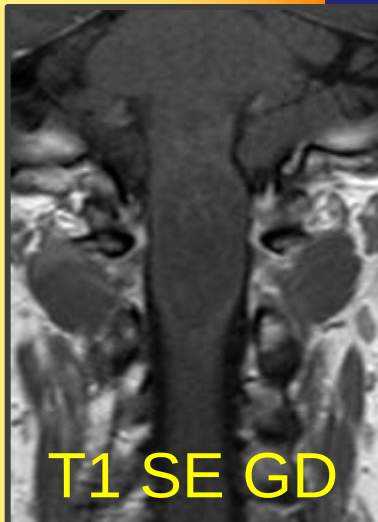
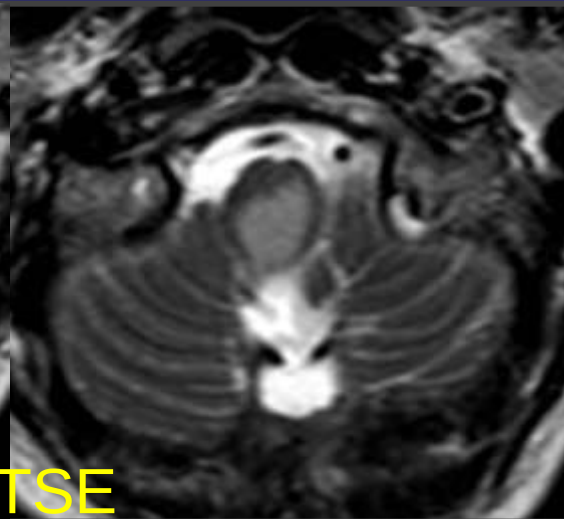
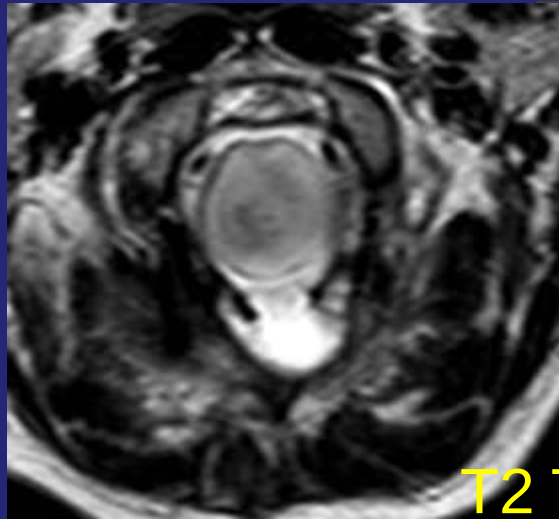
Gado

Femme de 40 ans, baisse de l'acuité visuelle



Courtesy S.Grand

GLIOME bas grade



Patiente de 22 ans,
découverte
pour bilan d'épisodes
cervicalgies, torticoli

Courtesy S GRAND

UN PUBLIC EXIGEANT



MERCI
Pour votre
Attention !



1995-2013