

# Imagerie par Résonance Magnétique

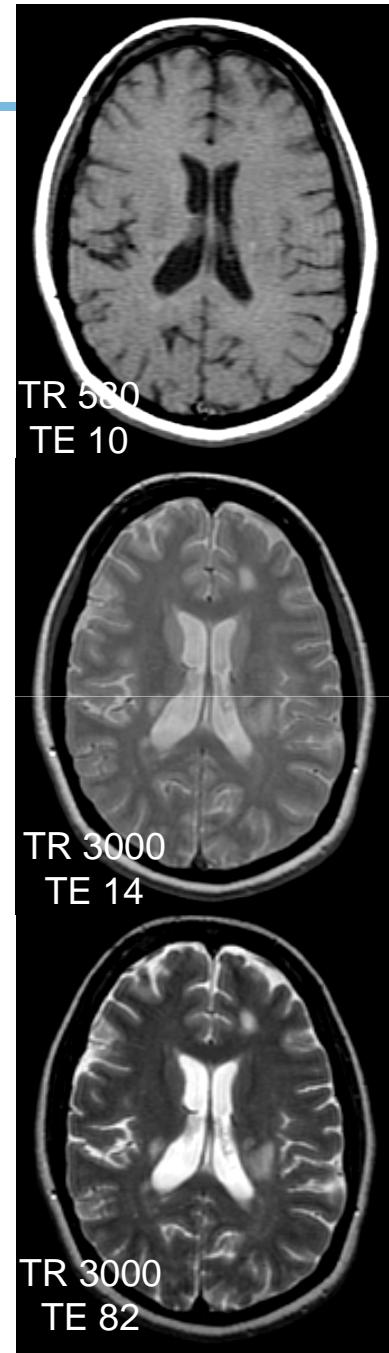
## Objectifs

### 1- Primaires:

- Connaître l'origine physique du signal;
- Savoir reconnaître une images IRM (# TDM);
- Savoir reconnaître la pondération utilisée;
- Ne pas confondre les paramètres de relaxation et les paramètres de la séquence;
- Savoir décrire l'image avec la bonne terminologie;
- Interpréter le contraste.

### 2- Secondaires

- Connaître la réalisation pratique des examens;
- Comprendre les bases physiques du phénomène de RMN;
- Comprendre les liens entre les paramètres de la séquence et ceux de la relaxation des tissus.



# Imagerie par Résonance Magnétique

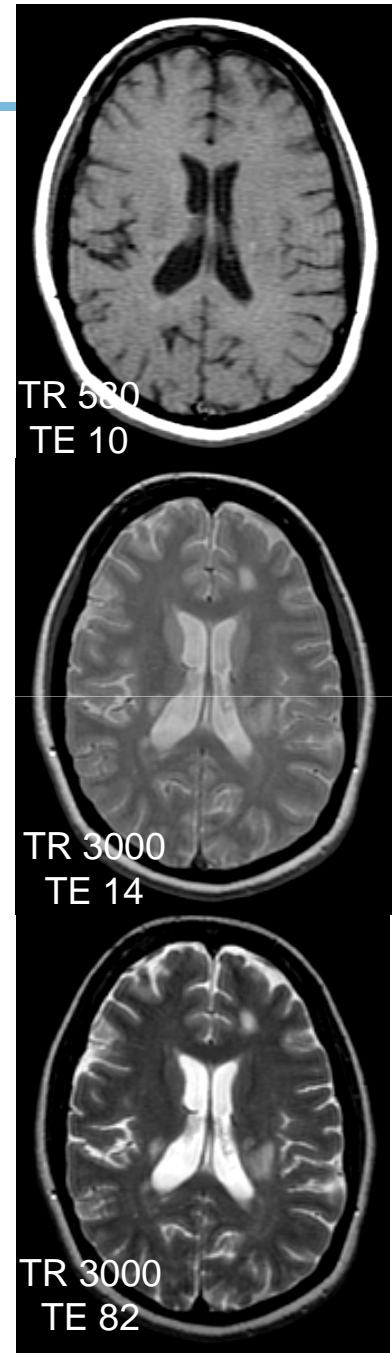
## Plan

### 1- Phénomène de résonance magnétique nucléaire (RMN)

Se déroule en 3 phases.

- 1.1- Précession
- 1.2- Résonance
- 1.3- Relaxation.

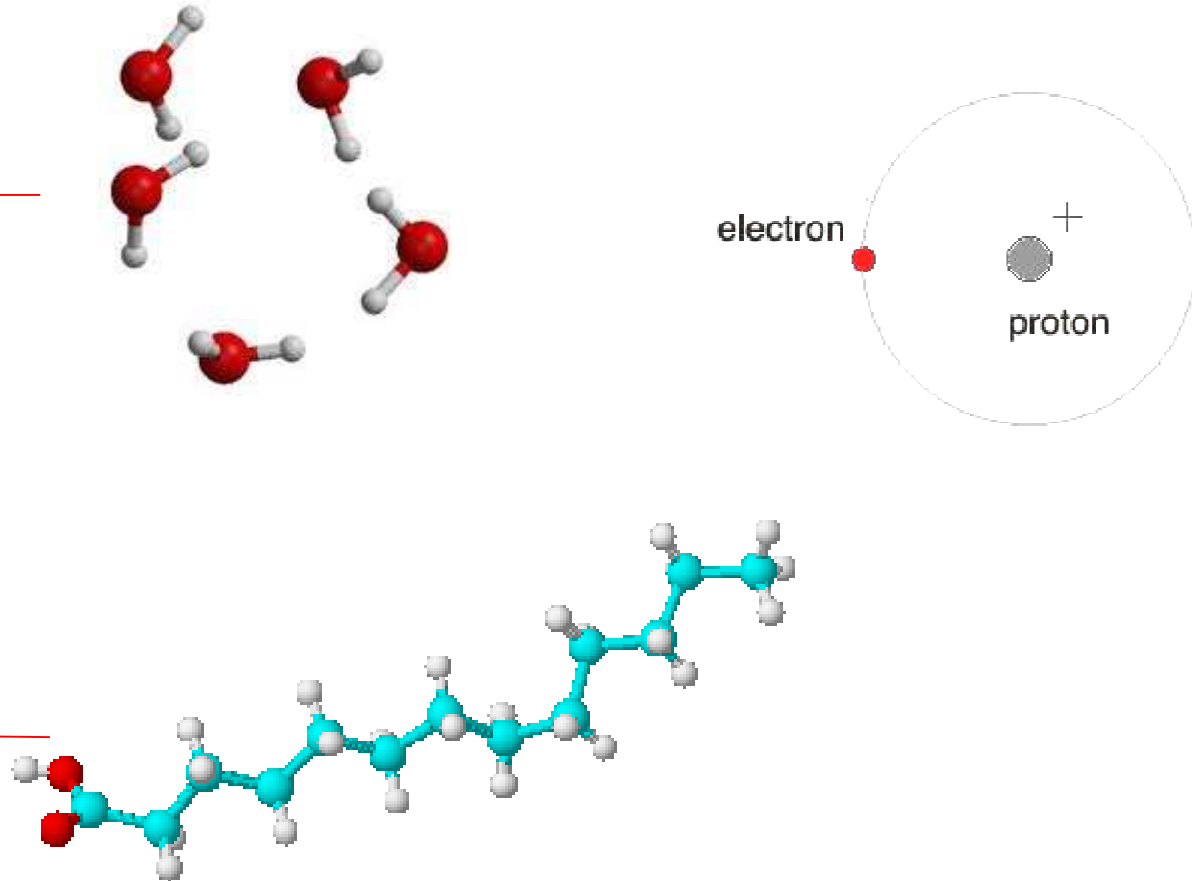
### 2- Imagerie par résonance magnétique (IRM)



# 1- Phénomène de résonance magnétique nucléaire (RMN)



Quel niveau physique est concerné ?



# 1- Phénomène de résonance magnétique nucléaire (RMN)

## 1.1- Précession

La précession est le résultat d'un couple magnétique exercé par le champ magnétique sur le noyau.

### 1.1.1- Champ magnétique

#### 1.1.1.1- Généralités

- Une particule chargée immobile crée un champ électrique, une particule chargée en mouvement crée un champ magnétique.
- La valeur de ce champ dépend de la forme du circuit, de l'intensité du courant et de la position dans l'espace.

- Pour un solénoïde:  $B = \mu_0 I$

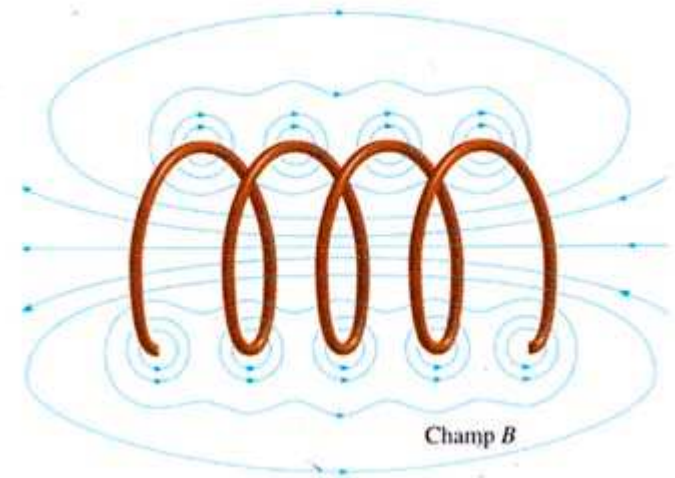
$\mu_0$  = « perméabilité magnétique du vide »

$n$  = nombre de spires

$I$  = intensité du courant

- Unité de champ magnétique: le Tesla

Champ magnétique terrestre  $5 \cdot 10^{-5}$  T (50  $\mu$ T)



### 1.1.1.2- Les différents types d'aimants

- Résistifs (« électro-aimants »)

Solénoïde dans lequel circule un courant électrique I.

Echauffement +++ (1 tonne d'eau par heure/0,1T)

- Permanents

- Supra-conducteurs

Alliages supraconducteurs (résistance nulle = pas d'effet Joule) à des températures proches du zéro absolu ( $-269^{\circ}$  C).

Refroidissement à l'hélium liquide.

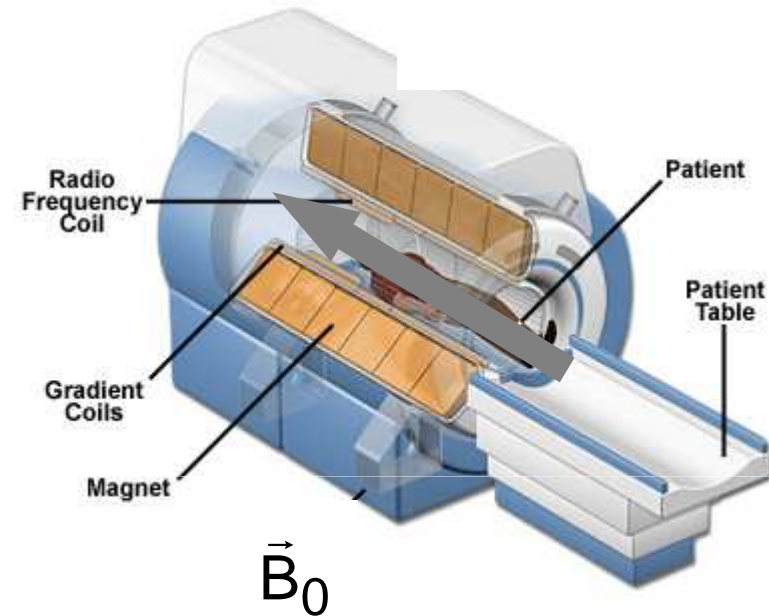
Problème du « quench ».



### 1.1.1.3- Le champ magnétique d'une IRM

L'aimant de de la machine IRM génère un champ  $\vec{B}_0$  de 0,5 à 2 T.

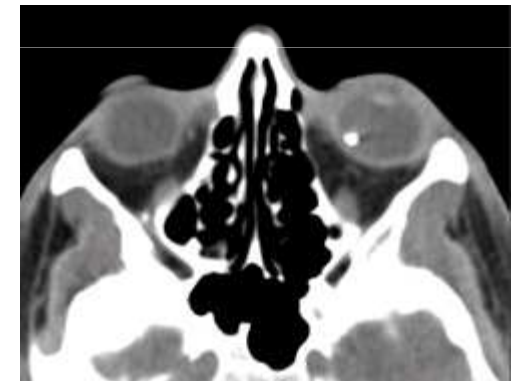
- Aimant supra-conducteur.
- Champ puissant (1,5 T soulève 10 kg) (10 000 à 40 000 fois le champ magnétique terrestre = 50 $\mu$ T).



### 1.1.1.4- Les risques du champ magnétique d'une IRM

Champ magnétique intense = risques particuliers

- **Effet projectile:** matériel ferromagnétique (attraction par le champ magnétique statique et accélération avec des vitesses pouvant atteindre plusieurs mètres par secondes)
- **Déplacement de corps étrangers métalliques intra-corporels :** Corps étranger métallique intraoculaire, anciens clips vasculaires intra-crâniens
- **Perturbation du fonctionnement de certains matériels:** stimulateur cardiaque, neurostimulateurs, implant cochléaire, valves de dérivation

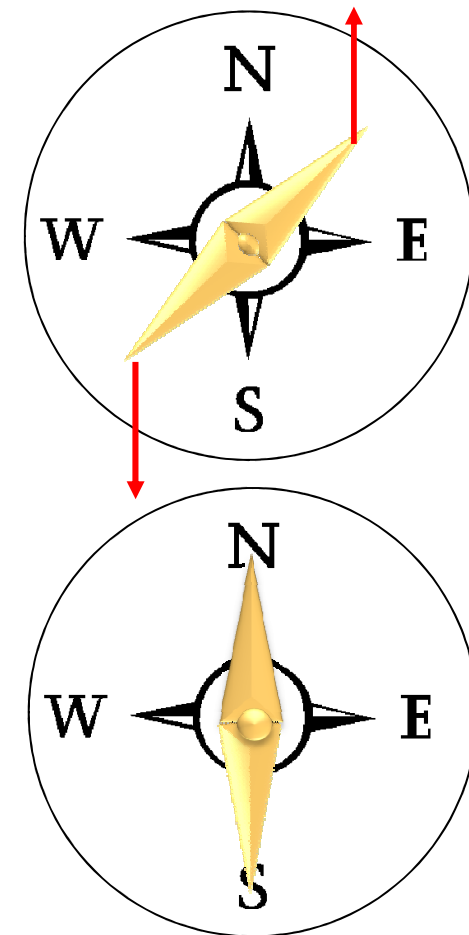


## Rappel

La précession est le résultat d'un couple magnétique exercé par le champ magnétique sur le noyau.

### 1.1.1.4- Notion de couple

- C'est un système de forces qui s'applique à un objet de telle sorte que le centre d'inertie reste immobile et que l'objet n'est pas équilibré dans une position donnée.



# 1- Phénomène de résonance magnétique nucléaire (RMN)

## 1.1.2- Effet sur les noyaux

- Certains noyaux soumis à un champ magnétique, subissent un couple: ceux dont le moment magnétique est non nul.

- Dans un noyau, les nucléons peuvent prendre une valeur de spin de  $\pm 1/2$ .

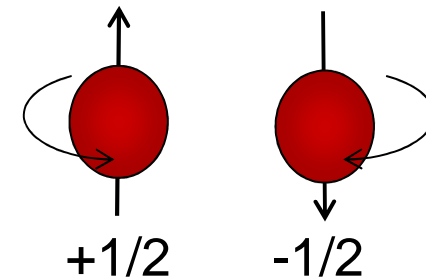
- Les noyaux ont un moment magnétique:

$\gamma$  = rapport gyromagnétique caractéristique du noyau

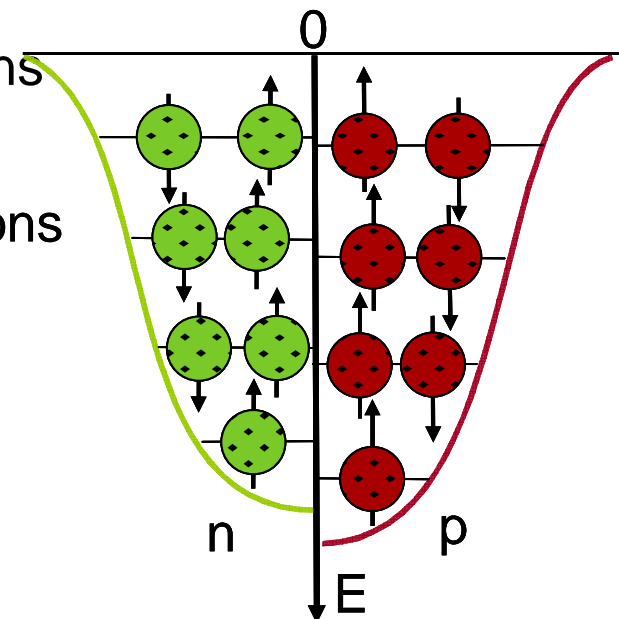
$\hbar$  = cte de Planck  $(h)/2\pi$

$I$  = nombre quantique de spin =  $\Sigma$  spins des nucléons

- Selon le modèle « en couche », neutrons et protons s'apparient ( $+1/2$  et  $-1/2$ ) annulant leurs moments magnétiques (lorsque en nombre pair).



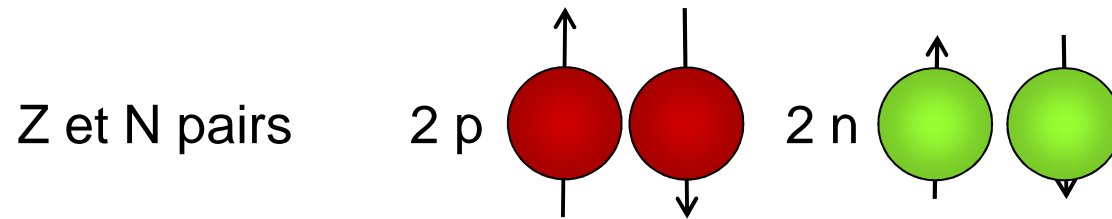
$$\mu = \gamma \hbar I$$



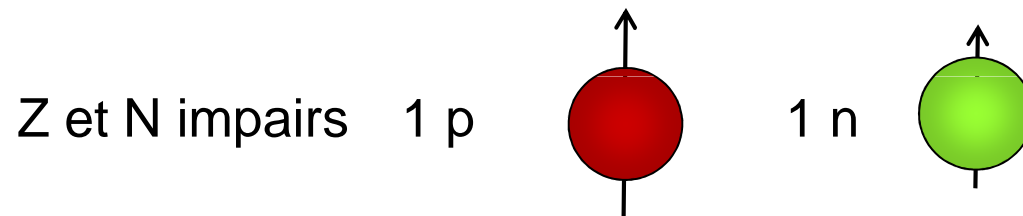
# 1- Phénomène RMN 1.1- Précession 1.1.2- Moment magnétique nucléaire

- Le nombre quantique de Spin du noyau:

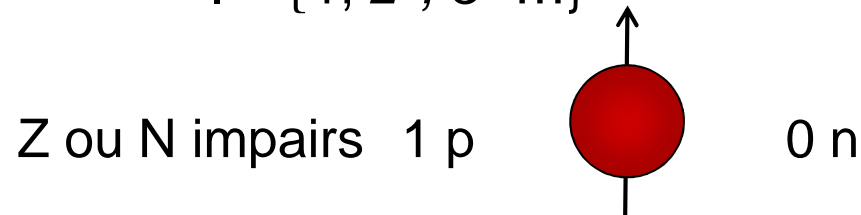
$$I = \Sigma \text{ spins des nucléons}$$



$$I = 0$$



$$I = \{1, 2^*, 3^* \dots\}$$



$$I = \{1/2, 3/2^*, 5/2^* \dots\} \text{ * Explication différente}$$

Noyau	I	%
$^1_1\text{H}$	1/2	99,98
$^2_1\text{H}$	1	0,02
$^{12}_6\text{C}$	0	99
$^{13}_6\text{C}$	1/2	1
$^{14}_7\text{N}$	1	99,6
$^{15}_7\text{N}$	1/2	0,4
$^{16}_6\text{O}$	0	99,96
$^{17}_6\text{O}$	5/2	0,04
$^{23}_{11}\text{Na}$	3/2	100
$^{19}_9\text{F}$	1/2	100
$^{31}_{15}\text{P}$	1/2	100

- Pour l'imagerie, on considère uniquement le phénomène de RMN induit au niveau du noyau d'hydrogène (2/3 des atomes de l'organisme).

### 1.1.3- Mouvement de précession des protons

#### 1.1.3.1- du proton pris isolément (moment microscopique)

- Interaction entre  $\vec{\mu}$  et  $\vec{B}_0$ .
- Le proton tourne en décrivant un cône dont l'axe est parallèle à  $\vec{B}_0$ .

- La vitesse angulaire de rotation est:

$$\omega_0 = \gamma B_0 \text{ [radian.s}^{-1}\text{]}$$

- Elle correspond à la fréquence de Larmor:

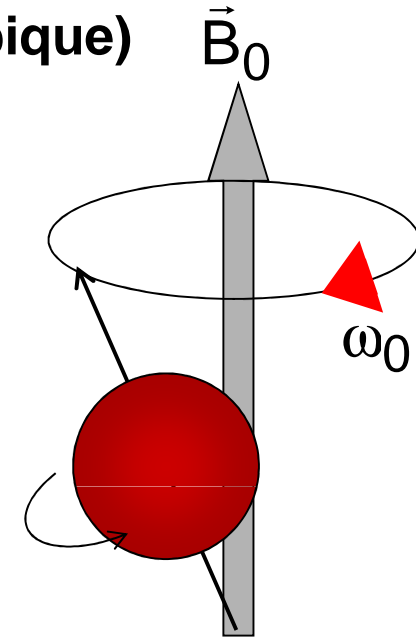
$$\omega_0 = 2\pi\nu_0$$

$$\nu_0 = \frac{\gamma B_0}{2\pi} \text{ [Hz]}$$

Exemple:  $\gamma / 2\pi = 42,6 \text{ MHz.T}^{-1}$

- Si  $B_0 = 1 \text{ T}$ ,  $\nu_0 = 42,6 \text{ MHz}$

- Si  $B_0 = 0,5 \text{ T}$ ,  $\nu_0 = 21,3 \text{ MHz}$

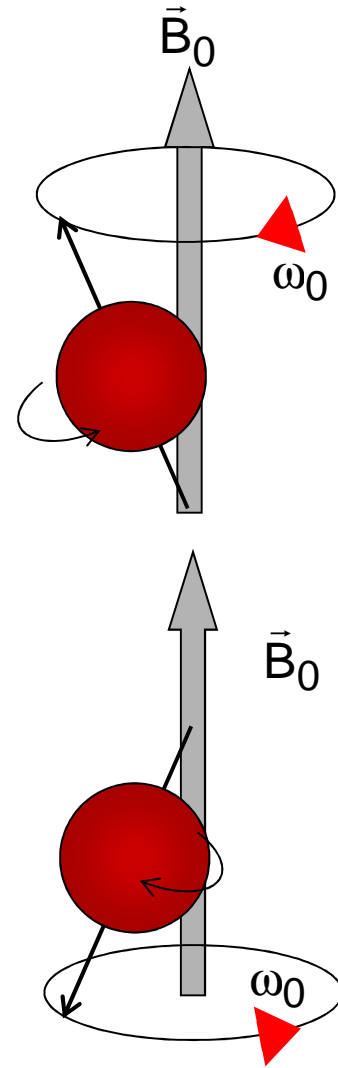


# 1- Phénomène de RMN 1.1- Précession 1.1.3- Mouvement de précession

## 1.1.3.1- du proton pris isolément (moment microscopique)

En fait la précession est double.

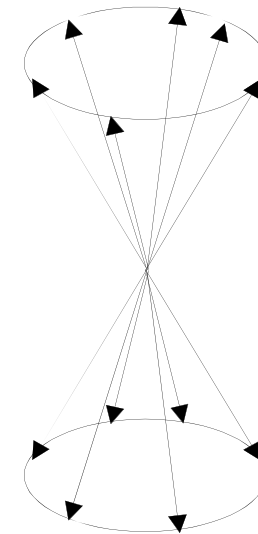
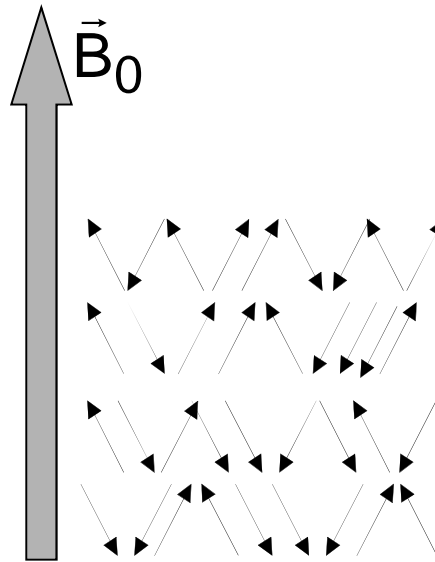
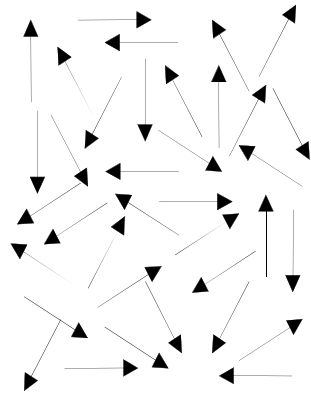
- Parallèle (« up »)
- Antiparallèle (« down »)



$$E = -\gamma\hbar \frac{B_0}{2}$$
$$\Delta E$$
$$E = +\gamma\hbar \frac{B_0}{2}$$

### 1.1.3.2- Mouvement de précession de l'ensemble des protons (moment macroscopique)

En l'absence de champ magnétique



$$\Sigma \vec{\mu} = 0$$

$$\vec{M} = 0$$

Sous l'effet de  $B_0$ , les protons précessent sur les deux cônes: parallèle et anti-parallèle.

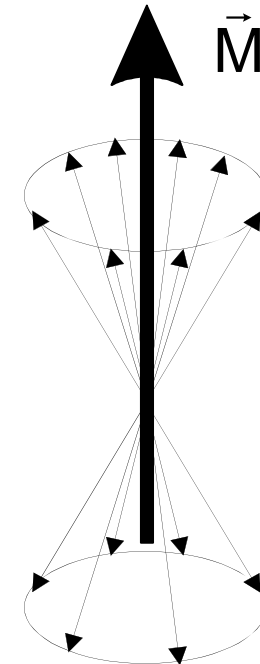
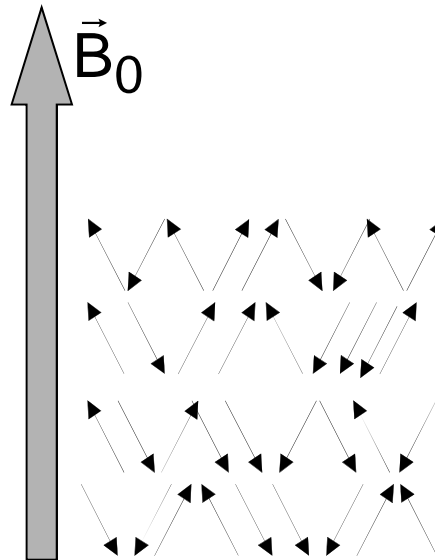
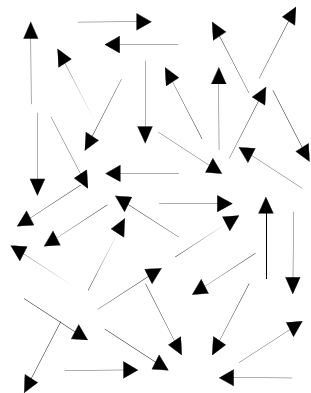
Si la répartition était égale:

$$\Sigma \vec{\mu} = 0$$

$$\vec{M} = 0$$

**1.2.3- Mouvement de précession de l'ensemble des protons (moment macroscopique)**

En l'absence de champ magnétique



$$\sum \vec{\mu} = 0$$

$$\vec{M} = 0$$

Dans un champ magnétique, un excès de protons (*5 / 1 million*) précesse dans le sens parallèle produisant une aimantation

$$\sum \vec{\mu} = \vec{M} \neq 0$$

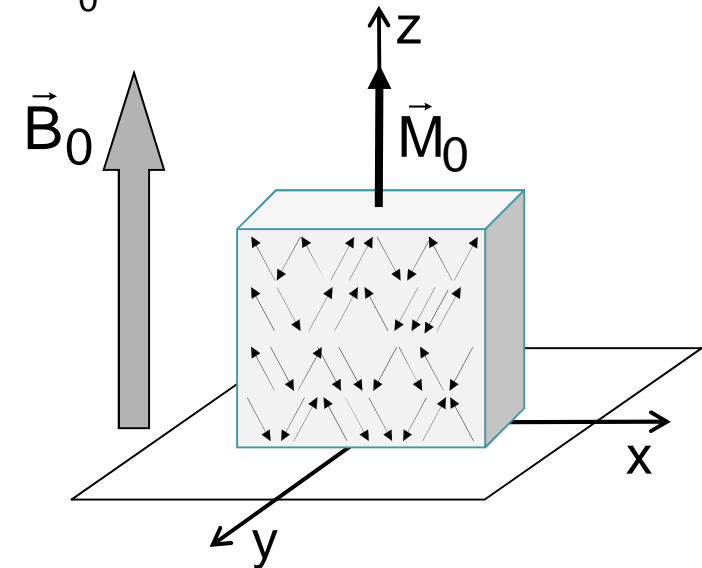
*Remarque:* le niveau d'énergie le plus bas est favorisé et la différence est proportionnelle à  $B_0$ .

## Résumé de la précession

Pour un examen IRM, un échantillon de tissu biologique est placé dans un champ magnétique  $B_0$ .

Les noyaux d'hydrogène (protons) du tissu précessent autour de  $B_0$  de telle sorte que l'échantillon acquière une aimantation  $M_0$ .

Le but de l'examen IRM est de mesurer les caractéristiques de cette aimantation.

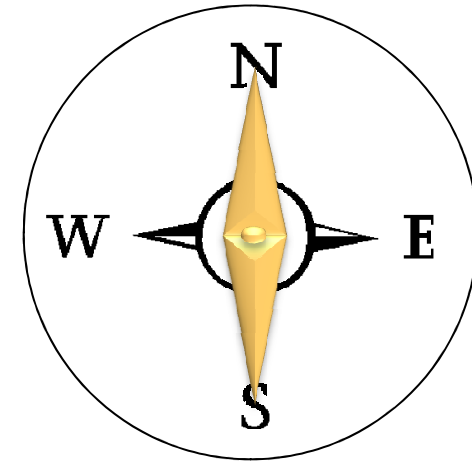


# 1- Phénomène de RMN

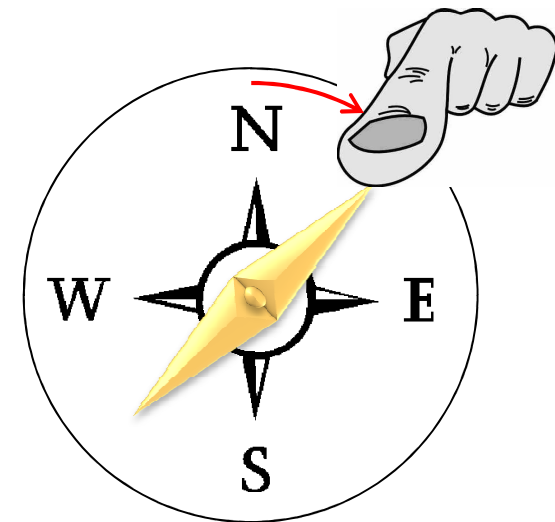
---

## 1.2- La résonance

Il est plus facile de mesurer une aimantation qui varie dans le temps qu'une aimantation au repos.



La résonance consiste à déplacer (basculer) le moment macroscopique  $\vec{M}$ .



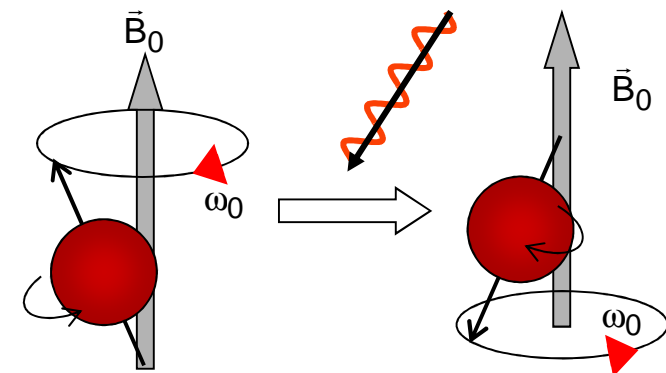
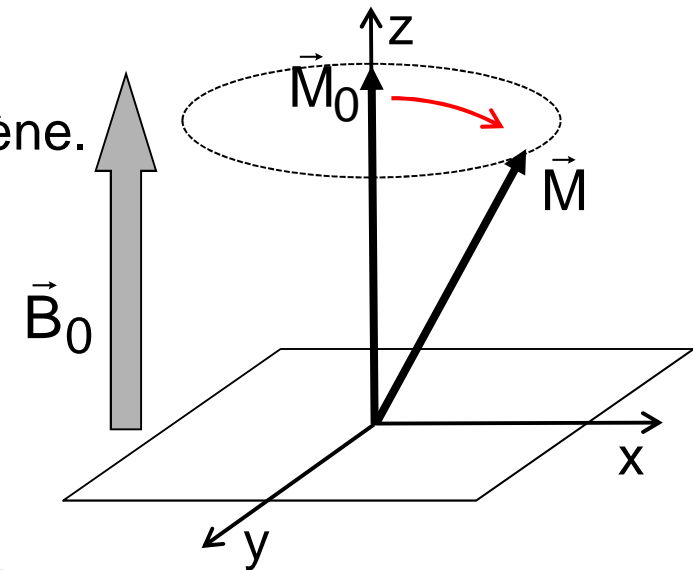
### 1.2.1- Origine de la bascule de M.

Deux descriptions possibles du même phénomène.

- **Un champ  $B_1$**  tournant dans un plan  $\perp$  à  $B_0$ . Lorsque la vitesse angulaire de rotation  $\omega$  est strictement égale à  $\omega_0$ , il « entraîne » M qui s'incline.
- **Une onde radiofréquence** à la fréquence de Larmor ( $E=h\nu_0$ ) va provoquer l'inversion de précession des protons.

$$\nu_0 = \frac{\gamma B_0}{2\pi} \text{ [MHz]}$$

$$h\nu_0 = \frac{\gamma h B_0}{2\pi} = \gamma \hbar B_0 = \Delta E$$



Remarque: cette fréquence de Larmor correspond au domaine des ondes radiophoniques.

## 1.2- Origine de la bascule de M.

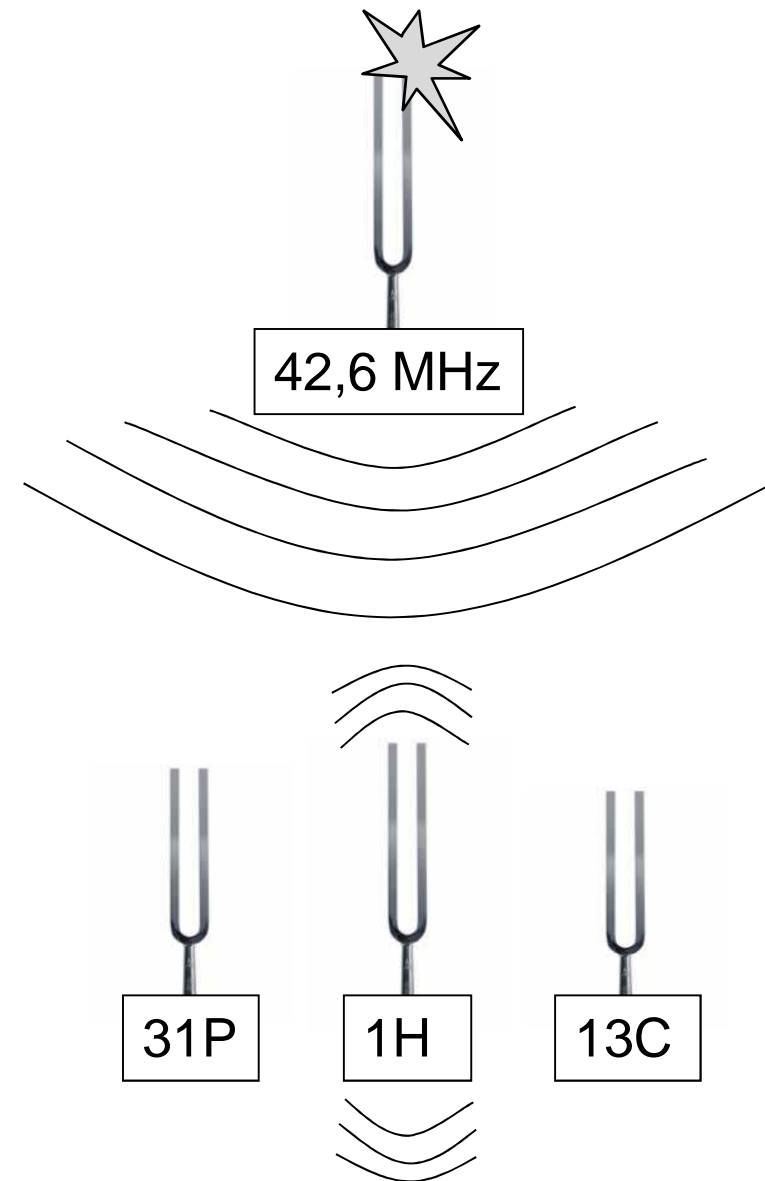
- La fréquence de Larmor:

$$\nu_0 = \frac{\gamma B_0}{2\pi} \text{ [MHz]}$$

Exemple: noyau d'hydrogène

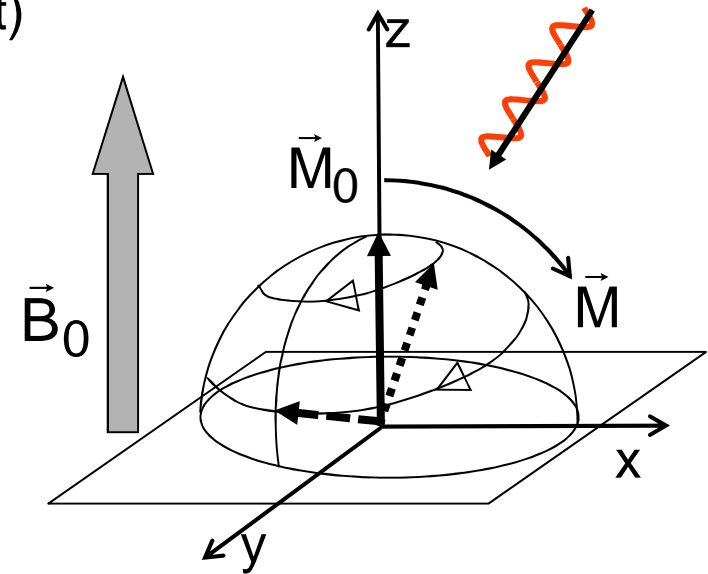
$$\gamma/2\pi = 42,6 \text{ MHz}\cdot\text{T}^{-1}$$

Si  $B_0 = 1 \text{ T}$ ,  $\nu_0 = 42,6 \text{ MHz}$



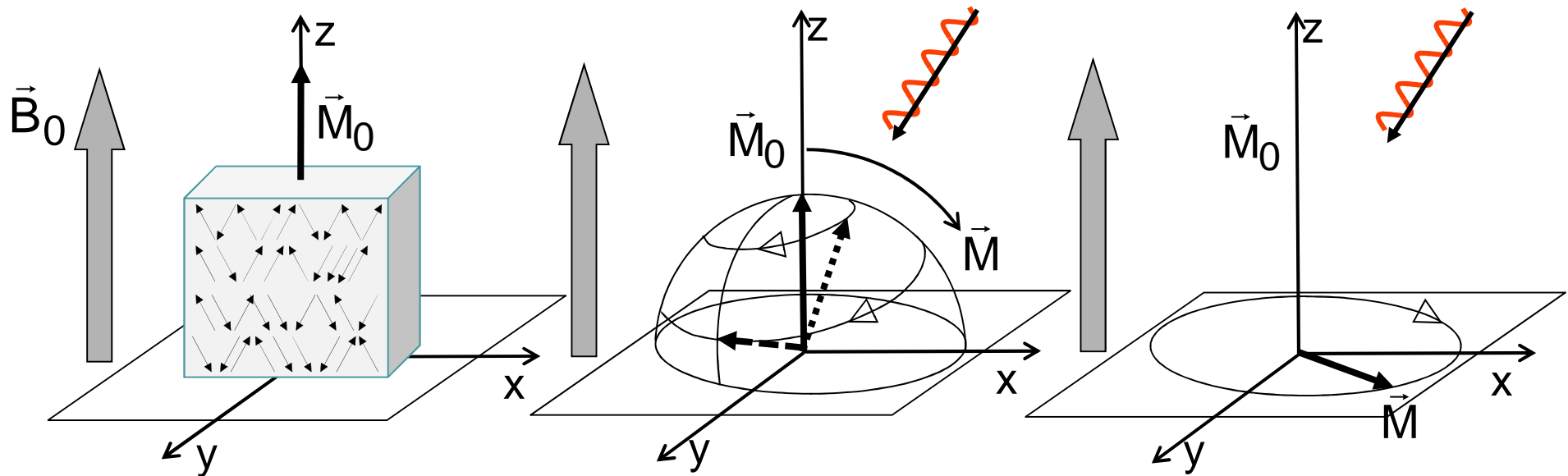
### 1.2.2- Effet de la résonance.

- L'onde radiofréquence (le champ  $B_1$  tournant) provoque l'inclinaison progressive de  $\vec{M}$ .
- $\vec{M}$  tourne autour de l'axe de  $B_0$  tout en s'inclinant. Il décrit une demi-sphère.
- La durée de l'application de l'onde RF détermine l'angle de bascule de  $M$ .
- On considérera un temps d'application tel que cet angle aboutisse à une bascule de  $\pi/2$ .



### Résumé de la résonance.

L'aimantation de l'échantillon biologique est inclinée par rapport à sa position d'équilibre grâce à une impulsion radiofréquence égale à celle de Larmor.



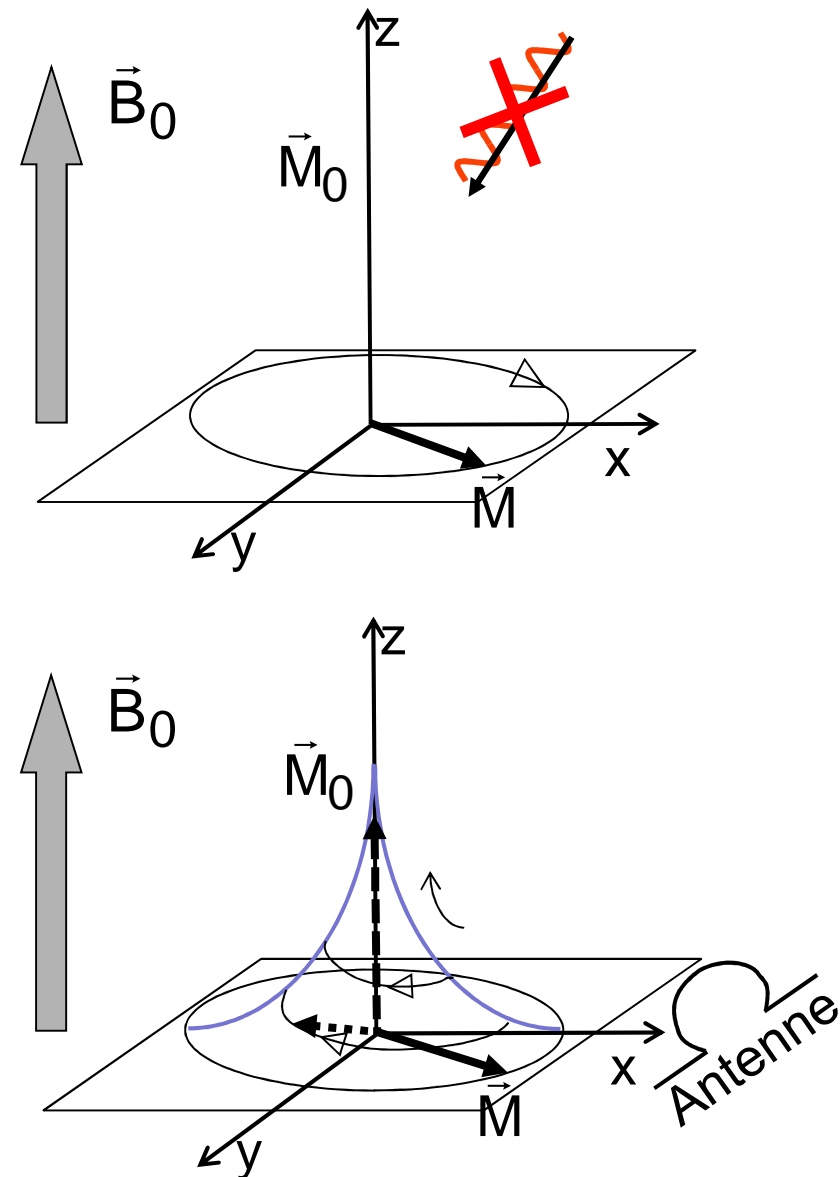
La mesure de l'aimantation se fait lors du retour à l'équilibre: lors de la phase de relaxation.

# 1- Phénomène de RMN

## 1.3- La relaxation

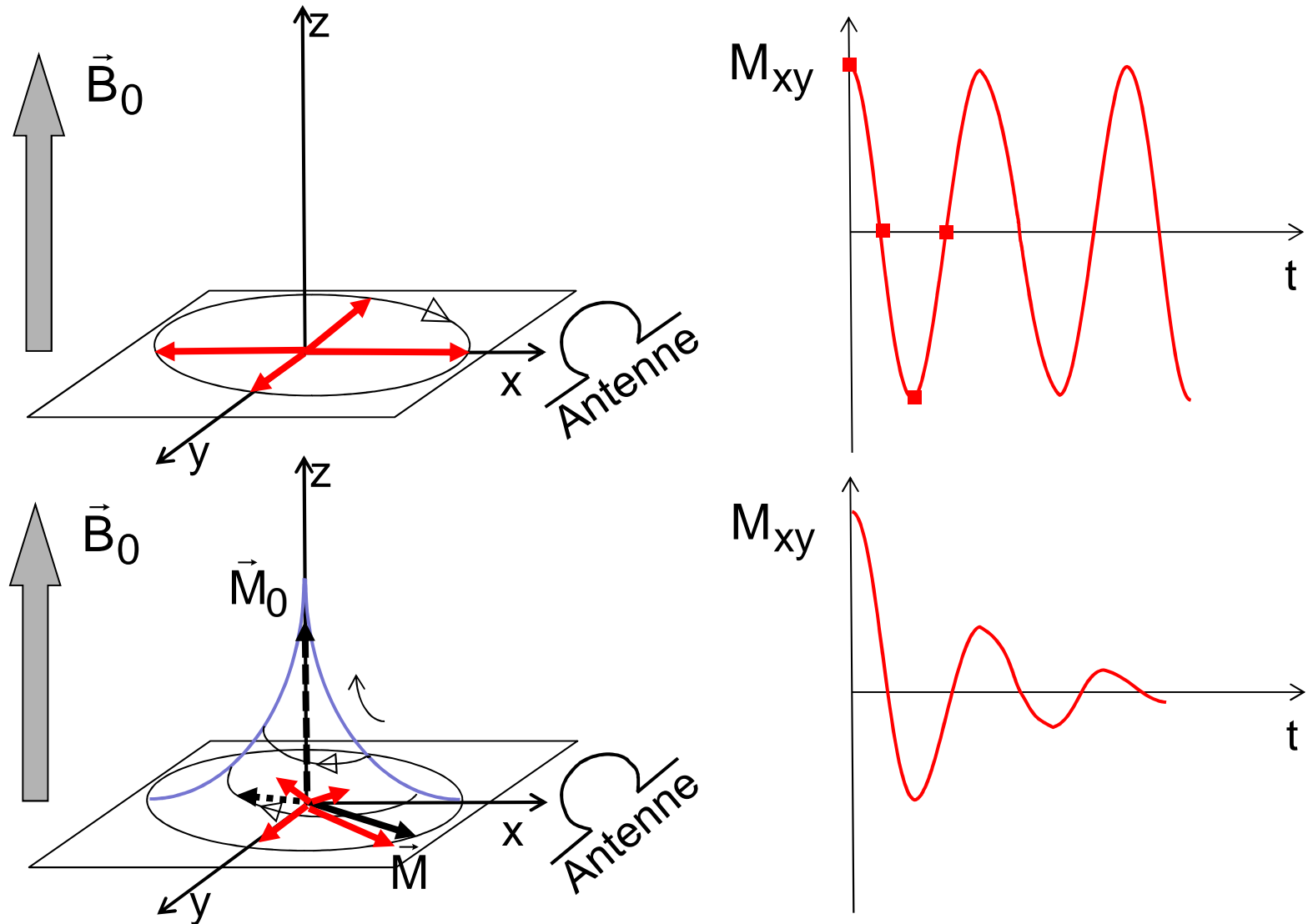
### 1.3.1- Description

- Le système a emmagasiné de l'énergie lors de la phase de résonance.
- A l'arrêt de l'onde radiofréquence, il restitue cette énergie en revenant à sa position d'équilibre.
- $M$  retrouve sa position d'équilibre en suivant une enveloppe en « pavillon de trompette ».
- Le système libère l'énergie de la résonance.
- C'est elle que l'on mesure.

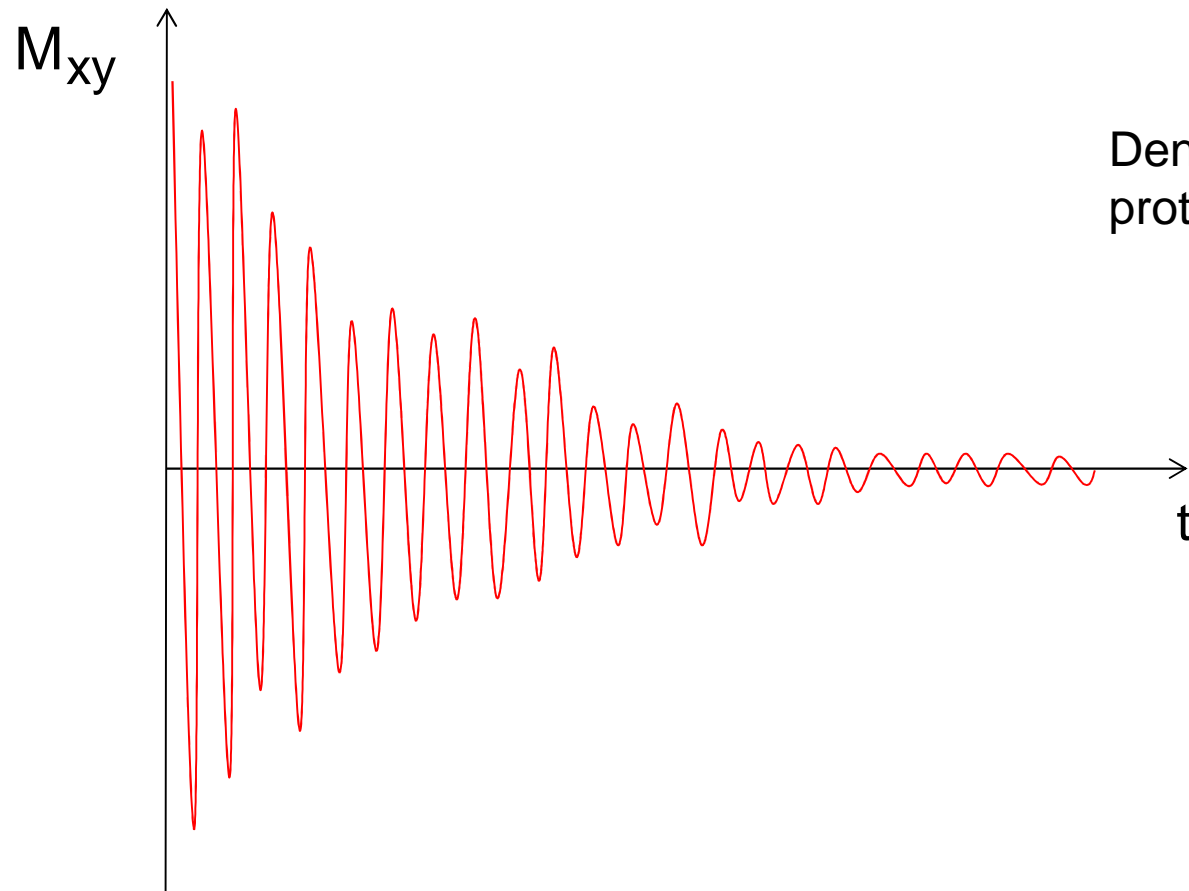


1.3.2- Le signal

- Le signal est lié à l'évolution de  $M_{xy}$ .



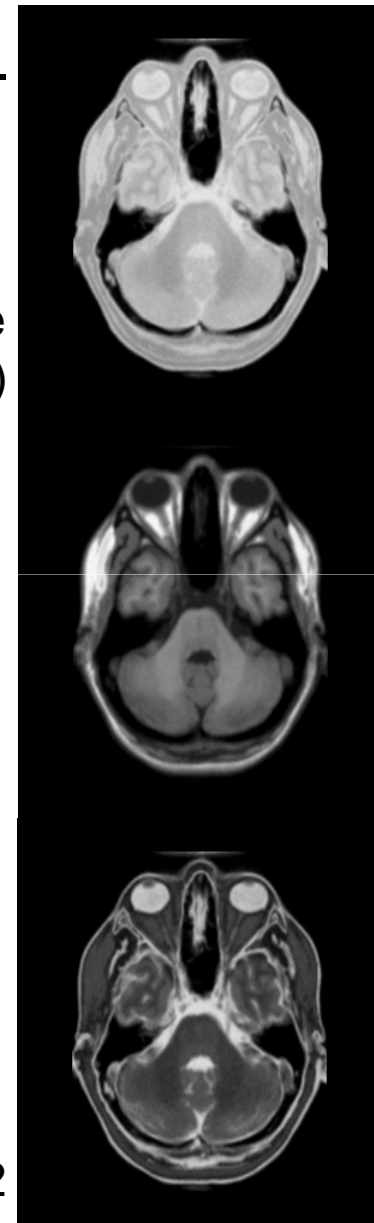
- Signal de précession libre ou Free Induction Decay (FID).



Densité de protons ( $\rho$ )

T1

T2

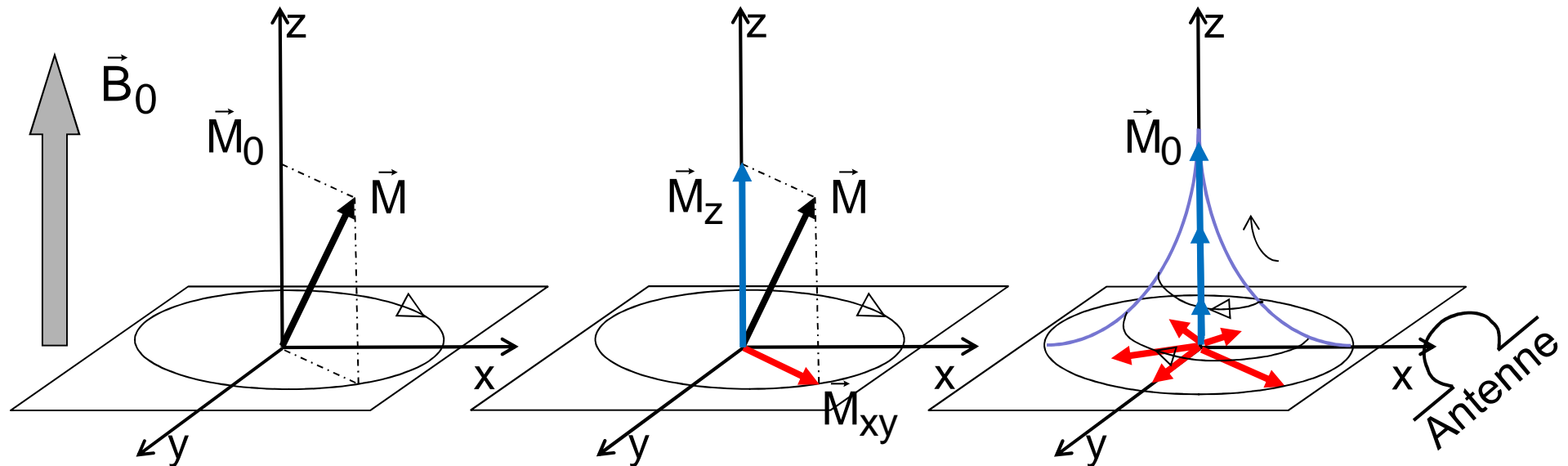


Images

## Description de la relaxation

- Pour décrire le mouvement de relaxation de  $\vec{M}$ , on le décompose en deux projections:

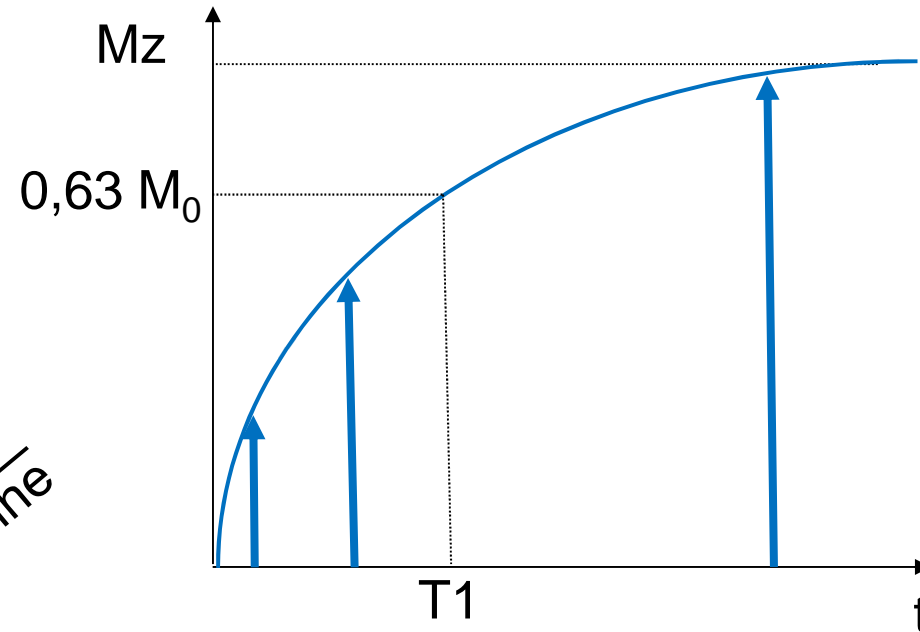
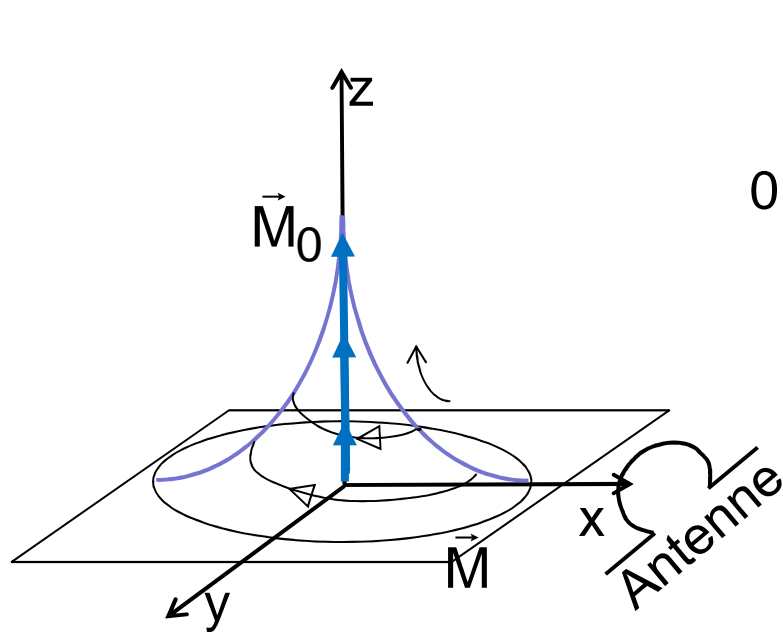
- ✓  $M_z$  sur l'axe  $z$ ;
- ✓  $M_{xy}$  sur le plan  $xOy$ .



- Permet de distinguer les différents paramètres de la relaxation.

### 1.3.3- Le paramètre de relaxation T1

- Evolution de  $M_z$ .
- Temps de relaxation longitudinale, spin réseau, de recroissance en  $z$ .



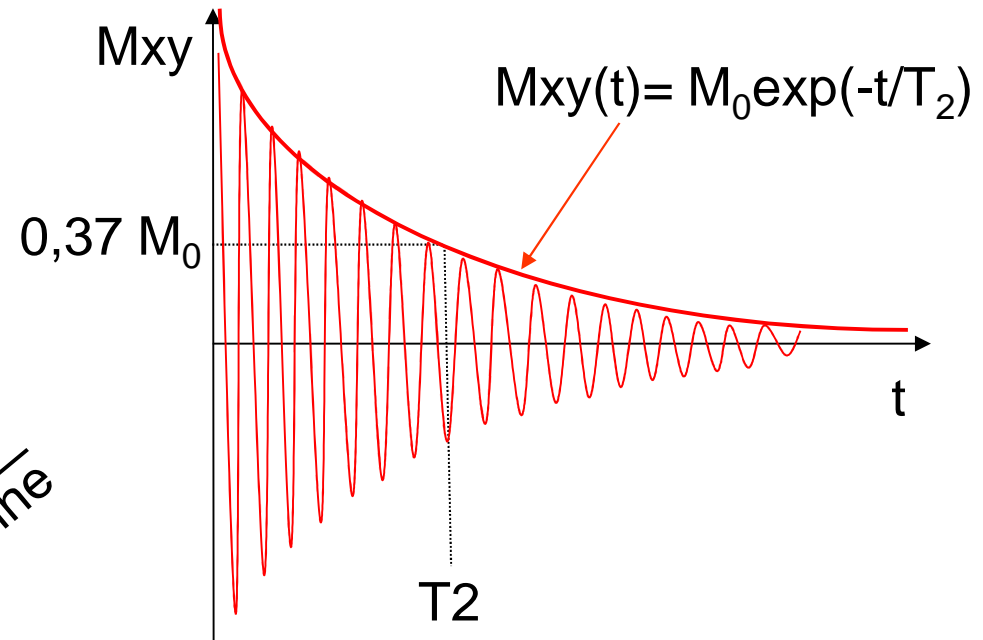
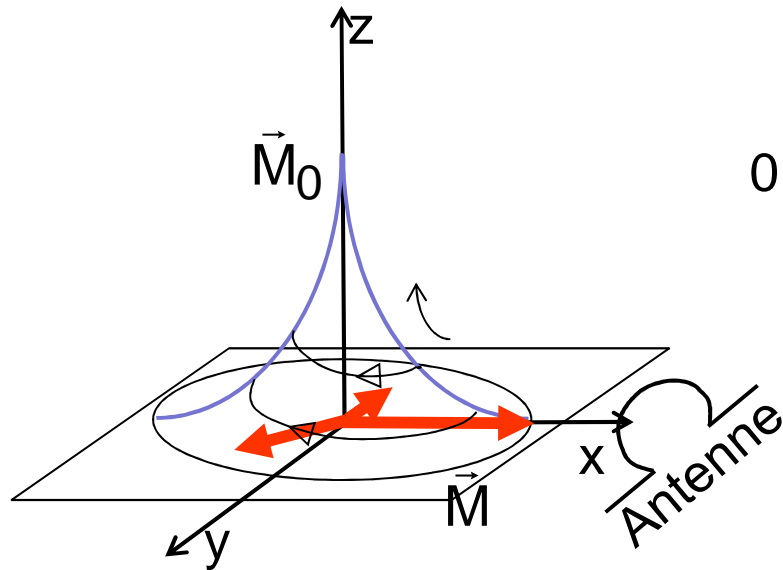
$$M_z(t) = M_0 [1 - \exp(-t/T_1)]$$

- $T_1 =$  « constante de temps de recroissance en  $z$  »

$$M_z(T_1) = M_0 [1 - \exp(-1)] = 0,63 M_0$$

### 1.3.4- Le paramètre de relaxation T2

- Evolution de  $M_{xy}$ .
- Temps de relaxation transversale, spin-spin, d'annulation de la composante transverse.



- $T_2 =$  « constante de temps de disparition de  $M_{xy}$  »

$$M_{xy}(T_2) = M_0 [\exp(-1)] = 0,37 M_0$$

*Remarque: amortissement selon  $T_2^*$*

### **Résumé de la relaxation**

- A l'arrêt de l'impulsion radiofréquence, l'aimantation revient à sa position d'équilibre.
- La composante longitudinale se relaxe avec une constante de temps  $T_1$ .
- La composante transversale disparaît avec une constante de temps  $T_2$  ( $T_2 \ll T_1$ ).
- La mesure de l'évolution de l'aimantation transversale constitue le signal IRM.



# Résonance Magnétique Nucléaire

## Plan

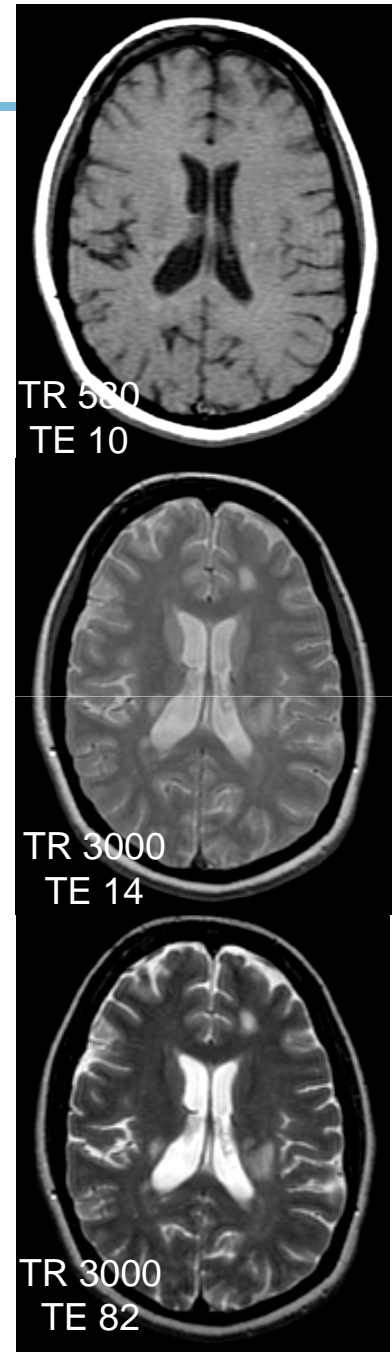
### 1- Phénomène de résonance magnétique nucléaire (RMN)

- 1.1- Précession
- 1.2- Résonance
- 1.3- Relaxation.

### 2- Imagerie par résonance magnétique (IRM)

#### 2.1 - Origine du contraste

- 2.2 - Les séquences en IRM
- 2.3 – Formation de l'image
- 2.4- Quelques exemples



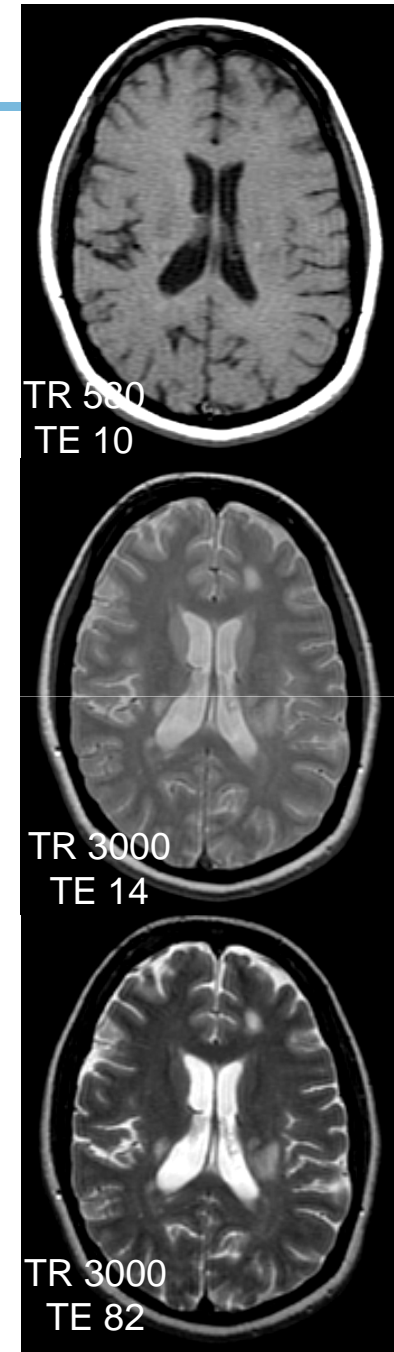
## 2- Imagerie par résonance magnétique (IRM)

### 2.1- Origine du contraste.

- Contraste = traduction des différences de signal RMN (aimantation) en niveaux de gris différents.
- On parle d'hypersignal et d'hyposignal.
- Trois types de contrastes et on parle d'images pondérées en:
  - ✓ densité de protons
  - ✓ T1
  - ✓ T2.

Hypersignal

Hyposignal



## 2- Imagerie par résonance magnétique (IRM) 2.1- Origine du contraste

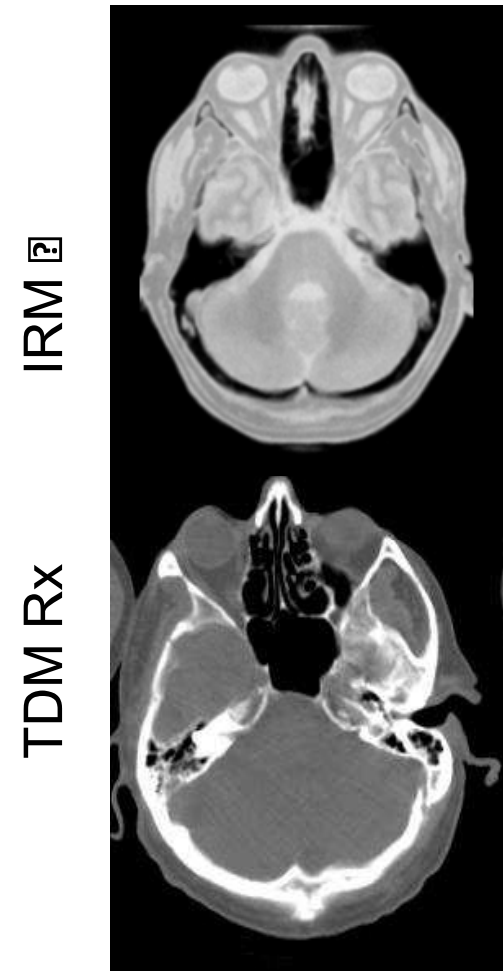
### 2.1.1- La densité de protons $\rho$ (rho)

- C'est la « concentration en noyaux d'hydrogène ». Elle est proportionnelle au % d'eau des tissus.

Comparaison à l'imagerie TDM Rx (scanner)

	IRM $\rho$	TDM Rx
	% eau	<i>U Hounsfield <math>\mu</math></i>
S. Grise	87	18 à 20
S. Blanche	73	12 à 16
LCR	100	0
Os	0	1000
Graisse	90	-100

- Absence d'hydrogène = absence de signal:  
Os cortical et air



### 2.1.2- Le paramètre de relaxation T1

Rappel.

- Constante de temps de relaxation longitudinale, de recroissance en z.

$$M_z(t) = M_0 [1 - \exp(-t/T_1)]$$

- Variations de  $T_1$  selon les tissus.

✓ Tissu a:  $T_{1a}$  court

✓ Tissu b:  $T_{1b}$  long

- Repère:

$$M_z(4T_1) = M_0 [1 - \exp(-4T_1/T_1)]$$

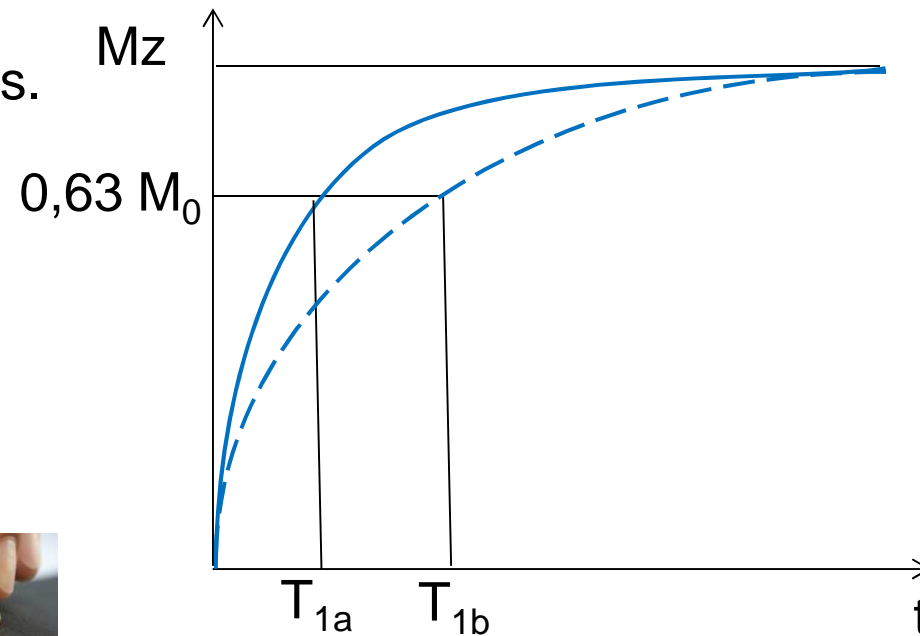
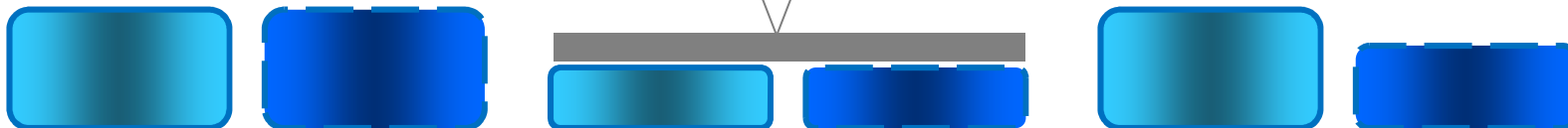
$$M_z(4T_1) = 0,98 \cdot M_0$$

- Analogie avec le retour après compression d'un objet viscoélastique:



compression

au bout d'un temps t

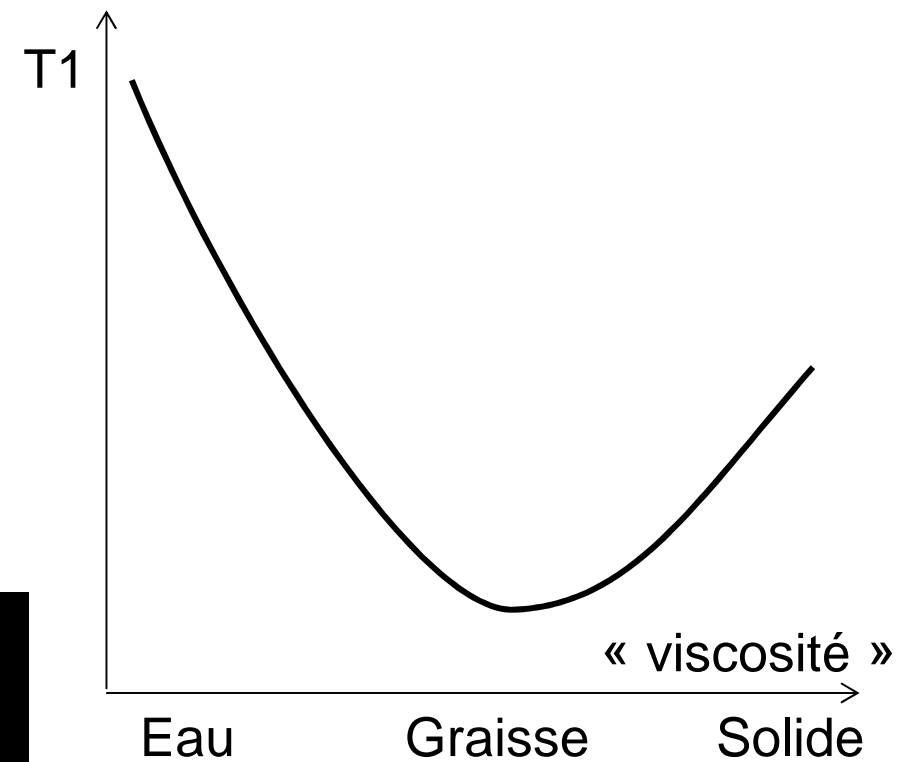
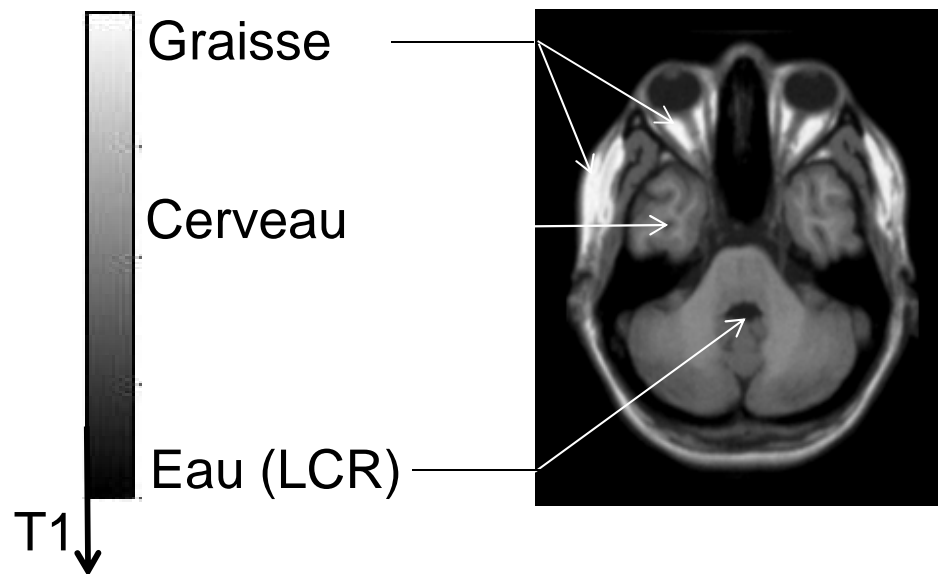


## 2- Imagerie par résonance magnétique (IRM)

### 2.1- Origines du contraste

#### 2.1.2- Le paramètre de relaxation T1

- Le T1 des tissus varie en fonction de leur viscosité.
- ✓ Maximum pour les liquides;
- ✓ Minimum pour les graisses;
- ✓ Intermédiaire pour les solides.
- T1 court → hypersignal



### 2.1.3- Le paramètre de relaxation T2

Rappel

- Constante de temps de relaxation transversale, d'annulation de la composante transverse.

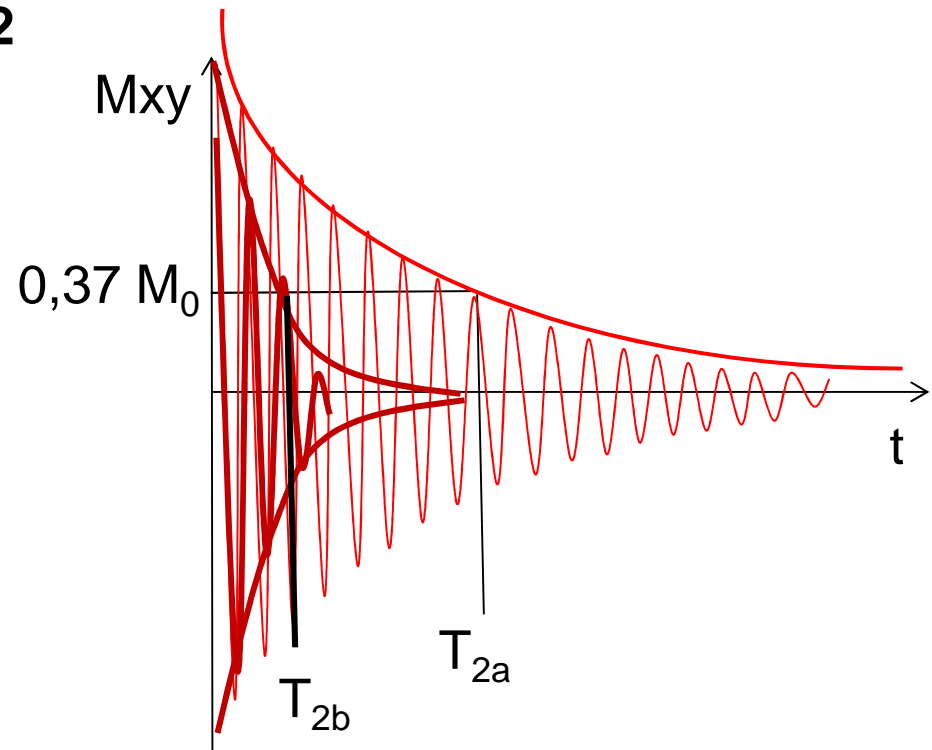
$$M_{xy}(t) = M_0 \exp(-t/T_2)$$

- Variations de T2 selon les tissus

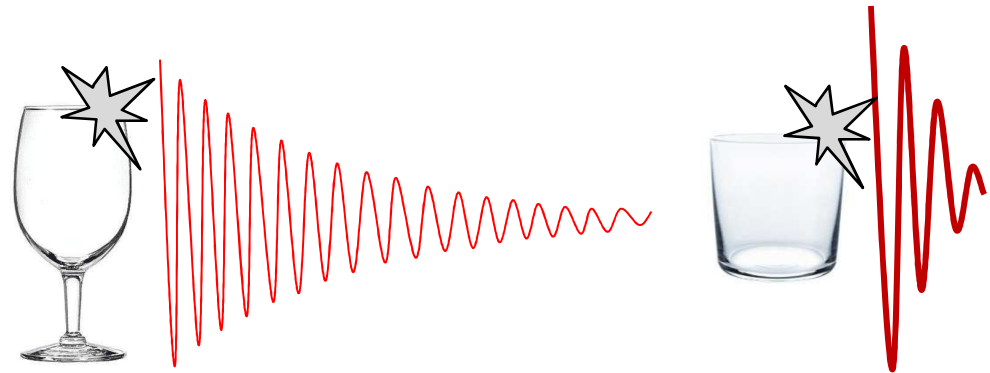
✓ Tissu a:  $T_{2a}$  long

✓ Tissu b:  $T_{2b}$  court

- Repère :  $M_{xy}(4T_2) = M_0 \exp(-4T_2/T_2) = 0,02.M_0$



- Analogie avec la vibration d'un verre

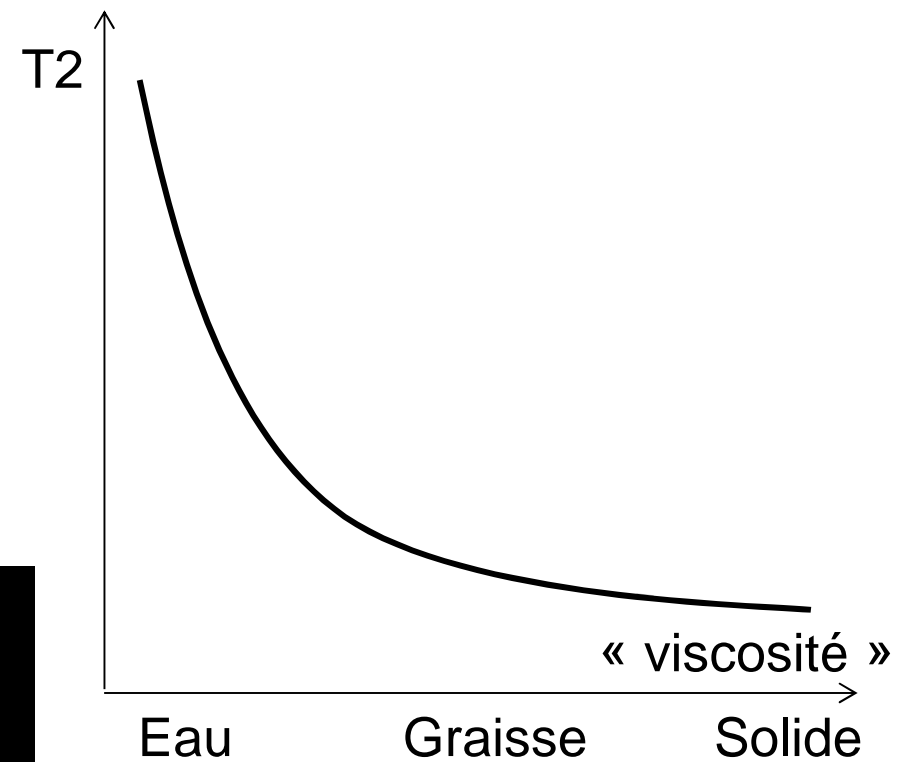
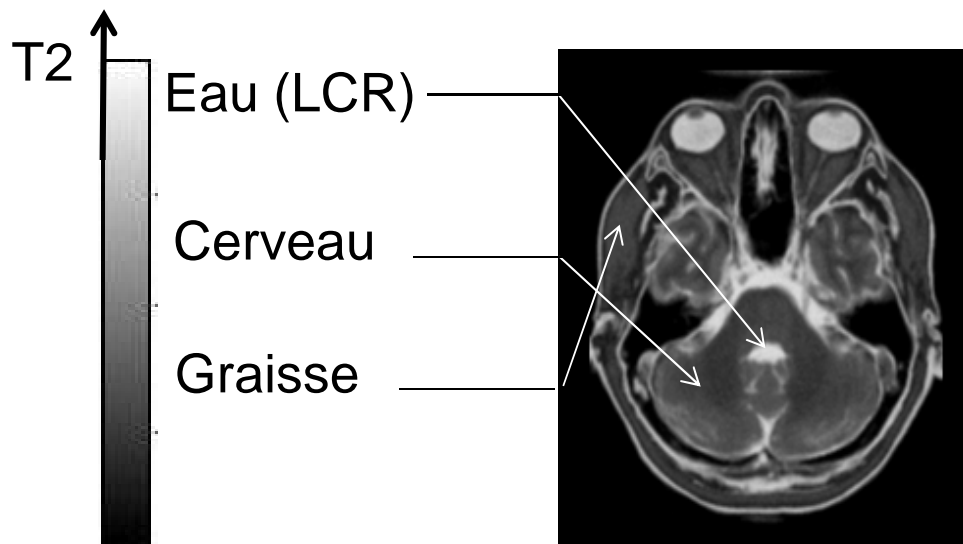


## 2- Imagerie par résonance magnétique (IRM)

### 2.1- Origines du contraste

#### 2.1.3- Le paramètre de relaxation T2

- Le T2 des tissus varie en fonction de leur viscosité.
- ✓ Maximum pour les liquides;
- ✓ Minimum pour les solides.
- T2 long → hypersignal

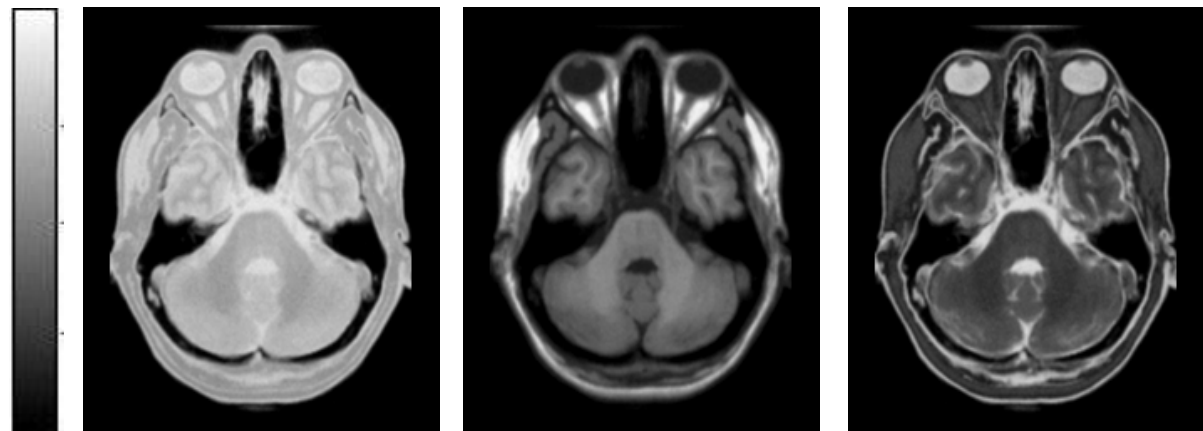


**2.1.4- Résultats**

- Trois types de contrastes (1,5 T)

	rho (%)	T1 (ms)	T2 (ms)
Graisse	100	150	75
LCR	100	2500	1000
S. Grise	87	850	100
S. Blanche	73	750	90
<i>Tumeur (gliome)</i> <i>(contraste / SB)</i>	<i>65</i> <i>(11%)</i>	<i>780</i> <i>(4%)</i>	<i>225</i> <i>(86%)</i>

- Trois types d'images



Rho

T1

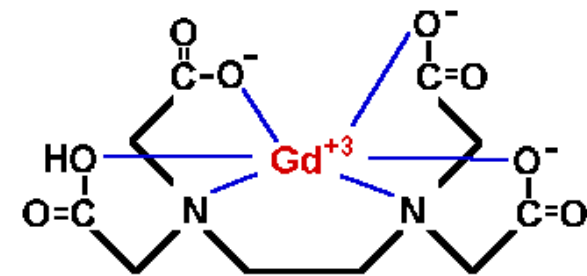
T2

### 2.1.5- Produit de contraste

#### Gadolinium –EDTA

- Injection intra-vasculaire (élimination rénale);
- N'est pas l'élément directement mis en évidence;
- Provoque le raccourcissement des temps de relaxation du noyau d'hydrogène (substance para-magnétique).

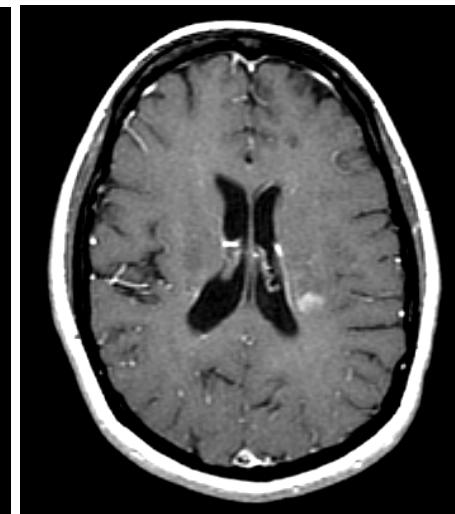
#### Gd-EDTA



Remarque: comme  $T1 \gg T2$  (et  $T2^*$ ), l'effet est utilisable seulement sur le T1



T1



T1+gadolinium