



# Cours 1

## Résonance Magnétique Nucléaire (RMN)

### I. Introduction

L'IRM est une **technique d'imagerie médicale importante en médecine** car elle donne de belles **images aux contrastes multiples**, riches en informations utiles au **diagnostic**. Elle possède de **nombreuses applications** : cœur, cerveau, genou, rachis...

Les **zones en hypersignal/en blanc** correspondent à des **graisses** (riches en acides gras) ou des **liquides** (riches en H<sub>2</sub>O), et **ont en commun une richesse en noyaux d'Hydrogène**.  
(graisse sous-cutanée et LCR cf 2 flèches).



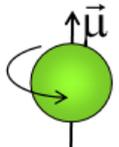
Le **niveau physique étudié** est donc le **noyau** (et pas l'atome !).

C'est le **noyau d'Hydrogène ou proton** (noyau d'H = 1proton) qui est **responsable du phénomène physique de la RMN**.  
(moyen mémo : Le N de RMN signifie nucléaire donc noyau)

### II. Notion de moment magnétique nucléaire

#### 1. Règle générale

Toute particule **chargée** et **en mouvement** génère un **moment magnétique  $\mu$** , qui la rend sensible à un **champ magnétique**.



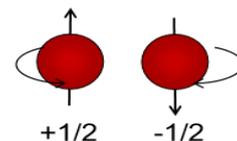
#### 2. Echelle des nucléons

Proton comme neutron sont **chargés** et **en mouvement**, donc possèdent un **moment magnétique  $\mu$  non nul**.

- ◆ **Chargés** car proton positif et neutron globalement neutre mais composé de 3 quarks chargés individuellement
- ◆ **En mouvement** car ils sont animés d'un **mouvement de rotation sur eux-mêmes** (comme une toupie) : c'est le **moment cinétique ou « spin »**.

Ce spin peut être orienté dans **2 directions** et prendre donc **2 valeurs** :

- + 1/2 si orienté du bas vers le haut
- 1/2 si orienté du haut vers le bas



#### 3. Echelle du noyau

C'est un ensemble de nucléons, donc il **possède également un moment magnétique  $\mu$**  :

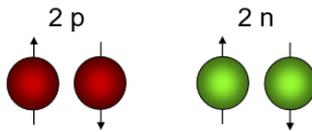
$$\mu = \gamma h I$$

avec  $\gamma$  = le rapport gyromagnétique caractéristique du noyau  
 $h = h/2\pi$  avec  $h$  la constante de Planck  
 $I$  = le nombre quantique de spin =  $\sum$  spin des nucléons

Les nucléons ont tendance à se regrouper par paires et par spin opposé.

Ainsi  $I$  peut prendre **plusieurs valeurs** selon le caractère pair ou impair des nucléons :

- Z et N pairs:  $I = 0$



- Z et N impairs:  $I = \{1, 2^*, 3^* \dots\}$



- Z ou N impairs:  $I = \{1/2, 3/2^*, 5/2^* \dots\}$



Noyau	$I$
${}^1_1\text{H}$	1/2
${}^{12}_6\text{C}$	0
${}^{13}_6\text{C}$	1/2
${}^{16}_6\text{O}$	0
${}^{31}_{15}\text{P}$	1/2

**Donc seuls les noyaux avec un nombre quantique de spin  $I$  non nul et donc un moment magnétique  $\mu$  non nul sont utilisables en RMN !!**

### III. Principe de la RMN

Un noyau possédant un moment magnétique non nul placé dans un champ magnétique est soumis à un couple de forces qui provoquent un mouvement de précession. Un champ magnétique tournant induit une résonance.

Le **phénomène de RMN** consiste à **modifier l'aimantation des noyaux d'H** et se déroule en **3 phases distinctes** : **précession, résonance, et relaxation**.

#### 1. La précession

##### Définition

C'est le résultat de l'**application d'un champ magnétique sur un objet présentant un moment magnétique**, dans notre cas sur les **noyaux d'H ou protons** de l'organisme.

##### Notion de champ magnétique

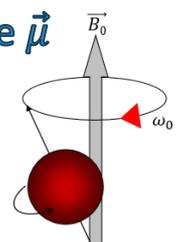
La machine IRM crée un **champ magnétique  $\vec{B}_0$ , très intense** :

- entre 0,5 et 3 T
- **10 000 à 60 000 fois le champ magnétique terrestre qui vaut  $50\mu\text{T}$**  (qui est donc très insuffisant pour créer un phénomène RMN).
- **puissant** car 1,5 T soulève 10 kg.

Remarque : ce champ est créé par un aimant supra-conducteur, qui permet une résistance nulle et pas d'effet Joule à des températures proches du 0 absolu (-269°C).

##### Mouvement de précession du proton isolé : moment microscopique $\vec{\mu}$

L'**interaction** entre le **moment magnétique  $\vec{\mu}$  du proton** et le **champ  $\vec{B}_0$**  fait que le **proton** tourne en décrivant un **cône dont l'axe est parallèle à  $\vec{B}_0$** .



La **vitesse angulaire de rotation** est alors :

$$\omega_0 = \gamma B_0 \text{ en } rad.s^{-1} \text{ avec } \gamma = \text{le rapport gyromagnétique}$$

$B_0 = \text{l'intensité du champ magnétique}$

Cela correspond à la **fréquence de Larmor** :

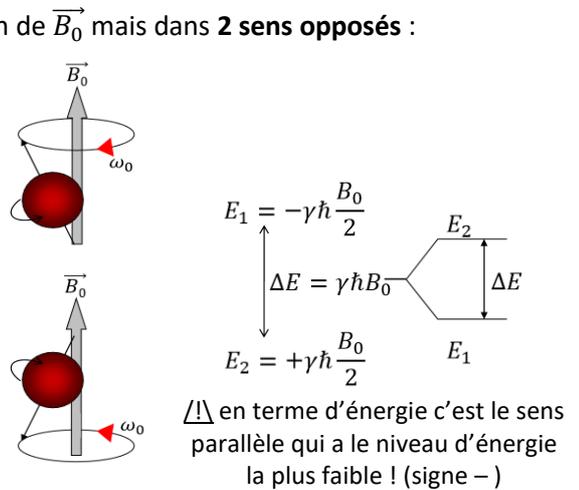
$$\nu_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{\gamma B_0}{2\pi} \text{ en } Hz$$

Exemple du noyau d'H :  $\frac{\gamma}{2\pi} = 42,6 \text{ MHz} \cdot T^{-1} \rightarrow \text{Si } B_0 = 1T \rightarrow \nu_0 = 42,6 \text{ MHz}$   
 Si  $B_0 = 2T \rightarrow \nu_0 = 85,2 \text{ MHz}$

En réalité, la **précession est double** cad qu'elle se fait dans la direction de  $\vec{B}_0$  mais dans **2 sens opposés** :

- **sens parallèle** (sens de  $\vec{B}_0$  ou vers le haut « up »)

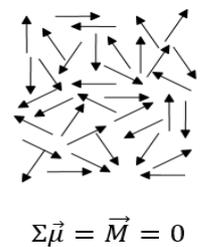
- **sens antiparallèle** (sens opposé à  $\vec{B}_0$  ou vers le bas « down »)



## Mouvement de précession de l'ensemble des protons : moment macroscopique $\vec{M}$

♦ Si **absence de champ magnétique**  $\rightarrow$  orientation aléatoire des protons

Donc  $\sum \vec{\mu} = \vec{M} = 0$  soit la somme des moments magnétiques individuels de chaque proton est nulle et donc le moment magnétique global  $\vec{M}$  est nul.

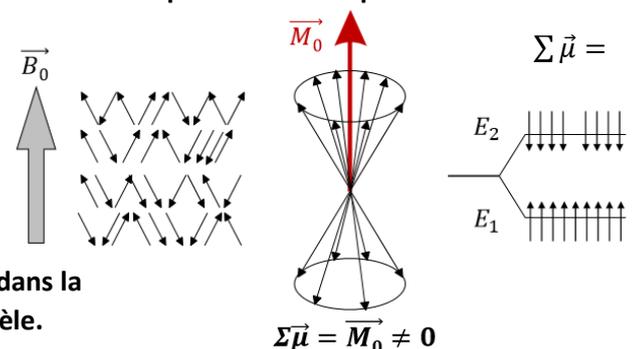


♦ Si **influence du champ magnétique**  $\rightarrow$  les protons précessent sur les 2 cônes parallèle et antiparallèle

En théorie ils se répartissent équitablement entre les 2 donc  $\vec{M} = 0$

En réalité il y a un **faible excès de protons** (20 sur 1 million) dans le sens **parallèle** donc la répartition n'est pas équitable !

Donc  $\sum \vec{\mu} = \vec{M} \neq 0$  avec  $\vec{M}$  (qu'on nomme  $\vec{M}_0$ ) orienté dans la direction et dans le sens parallèle.



## 2. La résonance

### Principe

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

La **résonance** consiste donc à « **basculer** » l'aimantation  $\vec{M}_0$ .

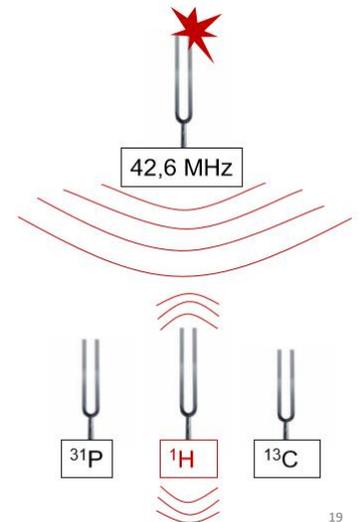
### Origine de la bascule de $\vec{M}_0$

La bascule est réalisée grâce à la **fréquence de Larmor du noyau** :  $\nu_0 = \frac{\gamma B_0}{2\pi}$

On **stimule le système à la fréquence de Larmor du noyau considéré** et seuls les **noyaux qui ont cette fréquence vont résonner** : on parle donc de **bascule sélective**.  
On déclenche ainsi le **phénomène RMN du noyau qui nous intéresse seulement**.

Exemple du noyau d'H :  $\frac{\gamma}{2\pi} = 42,6 \text{ MHz} \cdot T^{-1} \rightarrow \text{Si } B_0 = 1T \rightarrow \nu_0 = 42,6 \text{ MHz}$

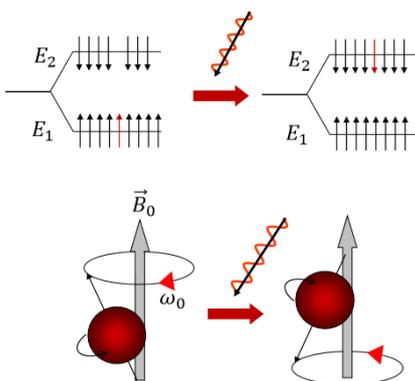
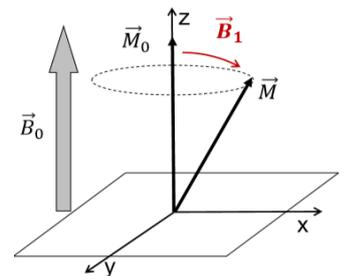
En soumettant le système à un champ de fréquence 42,6 MHz, qui correspond à la fréquence de Larmor des noyaux d'H, on fait basculer l'aimantation des noyaux d'H **EXCLUSIVEMENT** sans modifier l'aimantation des autres noyaux présents dans l'organisme susceptibles de faire l'objet d'une RMN (Phosphore-31 ou Carbone-13) car ils ont une fréquence de Larmor différente.



### Mécanisme de la bascule de $\vec{M}_0$

Il existe 2 explications différentes pour décrire la bascule de l'aimantation  $\vec{M}_0$  : (! 2 explications mais même phénomène !)

- ◆ Mécanique classique : On applique un **champ  $\vec{B}_1$  tournant perpendiculaire à  $\vec{B}_0$** . Lorsque la **vitesse angulaire de rotation  $\omega$  du champ tournant atteint la fréquence de Larmor**, l'aimantation  $\vec{M}_0$  **bascule/s'incline et s'écarte de sa position d'équilibre** (cad parallèle à l'axe de  $\vec{B}_0$ ).



- ◆ Mécanique quantique : On applique une **onde radiofréquence d'énergie  $E = h\nu$  avec  $\nu$  égal à la fréquence de Larmor**. Cette onde apporte de l'énergie au système et provoque l'**inversion de précession de certains protons du sens parallèle au sens antiparallèle** soit du niveau d'énergie le plus faible vers le niveau d'énergie le plus élevé. Cela permet d'**égaliser la répartition des protons entre sens parallèle et antiparallèle** (car pendant la précession on a un excès de protons dans le sens parallèle et là on en fait passer quelques-uns dans le sens antiparallèle), et donc **modifier l'aimantation globale résultante**.

### Propriétés de l'onde radiofréquence

Les ondes radiofréquence utilisées en RMN sont des **ondes radio** :

- **non ionisantes**  $\rightarrow$  **pas d'effets biologiques**
- **assez courantes** dans notre environnement (télé, radio...)

! **Donc l'IRM est une technique non invasive !**

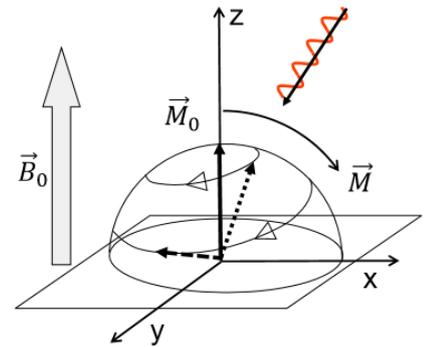
Remarque : des effets mécaniques sont cependant possibles sur les objets sensibles car les champs magnétiques sont puissants et ça peut représenter un danger donc il faut être vigilant.  
Il existe des contre-indications à l'IRM (clips vasculaires ou pacemaker) et on utilise du matériel non magnétique dans la pièce.

## Effet de la résonance

L'onde RF ou le champ tournant  $\vec{B}_1$  provoque l'inclinaison progressive en tournant de l'aimantation  $\vec{M}_0$ , jusqu'à la retrouver dans le plan xOy ou plan du champ  $\vec{B}_1$ .  
Le mouvement décrit ainsi une demi-sphère !!

La durée d'application de l'onde RF détermine l'angle de la bascule de  $\vec{M}_0$ .  
On considère un temps d'application de façon à obtenir une bascule  $\pi/2$  soit  $90^\circ$ .

Remarque : On peut aussi appliquer l'onde pendant moins longtemps  $\rightarrow$  angle  $< 90^\circ$  ou pendant plus longtemps  $\rightarrow$  angle  $> 90^\circ$



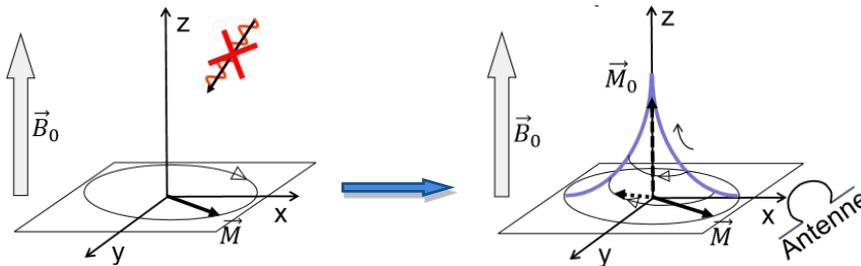
## 3. La relaxation

C'est la phase de mesure !

### Principe

On arrête l'onde RF ou le champ tournant  $\vec{B}_1$  ce qui provoque la relaxation de l'aimantation qui revient à sa position d'équilibre donc sur le plan de  $\vec{B}_0$ , car le système restitue l'excès d'énergie apporté pendant la résonance. Cette libération d'énergie est mesurée par une antenne pour nous donner le signal de RMN.

Le retour en position d'équilibre se fait par un mouvement qui décrit une enveloppe en pavillon de trompette !!



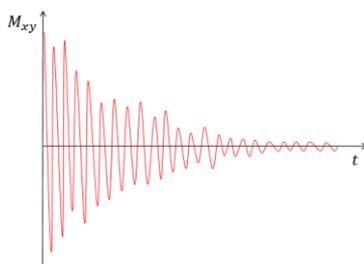
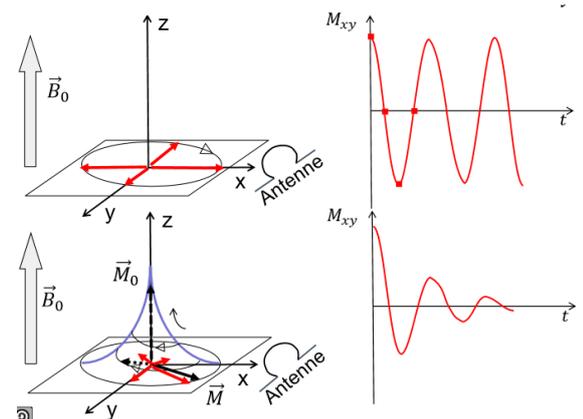
### Le signal

L'antenne est placée dans le plan xOy donc la mesure ne se fait que dans ce plan-là.

Le signal est lié à l'évolution de l'aimantation  $\vec{M}$  inclinée dans le plan xOy : c'est une sinusoïde.

Mais on n'obtient pas une sinusoïde parfaite théorique (en haut).

En réalité la sinusoïde est amortie et son amplitude diminue (en bas), car l'aimantation  $\vec{M}$  retourne petit à petit dans le plan de  $\vec{B}_0$  en même temps qu'elle tourne et donc s'éloigne de l'antenne qui ne bouge pas.

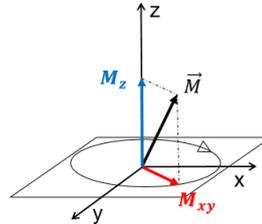


On appelle le signal réel obtenu, le signal de précession libre ou Free Induction Decay (FID)

## Description de la relaxation

On décompose l'aimantation  $\vec{M}$  en 2 projections :

- $M_z$  = aimantation longitudinale, dans le plan Oz
- $M_{xy}$  = aimantation transversale, dans le plan xOy

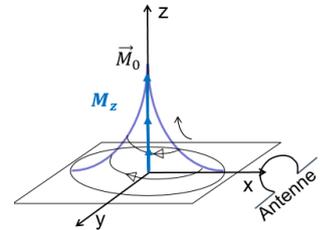


### ❖ Paramètre de relaxation T1

= temps de relaxation longitudinale ou spin-réseau ou temps de recroissance en z

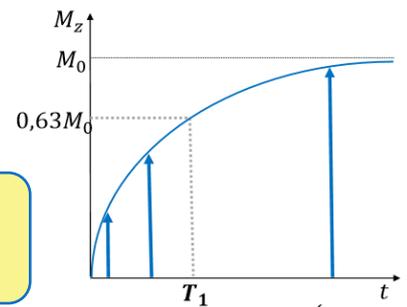
Il décrit l'évolution de  $M_z$ .

Description : on part de  $M_z$  nulle à la fin de la phase de résonance.  $M_z$  réapparaît progressivement au fur et à mesure de la relaxation et augmente jusqu'à retrouver sa position maximale d'origine  $M_0$ .



L'évolution est décrite par l'expression :  $M_z(t) = M_0(1 - e^{-\frac{t}{T_1}})$

On obtient une exponentielle croissante.



T1 est le temps au bout duquel  $M_z$  aura récupéré 63% de sa valeur maximale  $M_0$

$$M_z(T1) = 0,63M_0$$

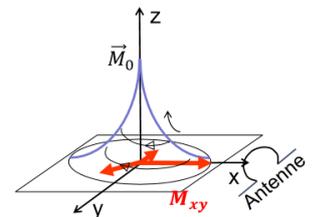
T1 varie selon les tissus : en IRM on obtient les images en jouant sur les différences de T1 entre les tissus.

### ❖ Paramètre de relaxation T2

= temps de relaxation transversale ou spin-spin ou temps de disparition de  $M_{xy}$

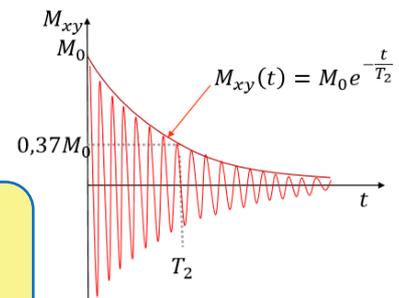
Il décrit l'évolution de  $M_{xy}$ .

Description : On part de  $M_{xy}$  maximale à la fin de la résonance (car on a atteint la bascule  $\pi/2$ ).  $M_{xy}$  disparaît progressivement au fur et à mesure de la relaxation.



L'évolution est décrite par l'expression :  $M_{xy}(t) = M_0 e^{-\frac{t}{T_2}}$

On obtient une exponentielle décroissante (qui correspond au FID).



T2 est le temps au bout duquel  $M_{xy}$  ne représente plus que 37% de son maximum au début.

$$M_{xy}(T2) = 0,37M_0$$

Ici aussi, T2 varie selon les tissus et l'IRM permet de distinguer les tissus selon T2 court ou long.

Remarques :

- $T2 \ll T1 \rightarrow$  c'est ça qui fait qu'on a une géométrie en pavillon de trompette et non en demi-sphère !
- L'amortissement se fait en réalité en  $T2^*$  (le prof ne précise pas plus)