



**HAL**  
open science

## Cours de M2 Technologie Médicale de l'UCA: Notions générales de RMN

Guilhem Pagès

► **To cite this version:**

Guilhem Pagès. Cours de M2 Technologie Médicale de l'UCA: Notions générales de RMN. Master. France. 2021. hal-03238790

**HAL Id: hal-03238790**

**<https://hal.inrae.fr/hal-03238790v1>**

Submitted on 27 May 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**INRAE**



# ➤ Notions de base en imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM)

Guilhem Pagés

INRAE

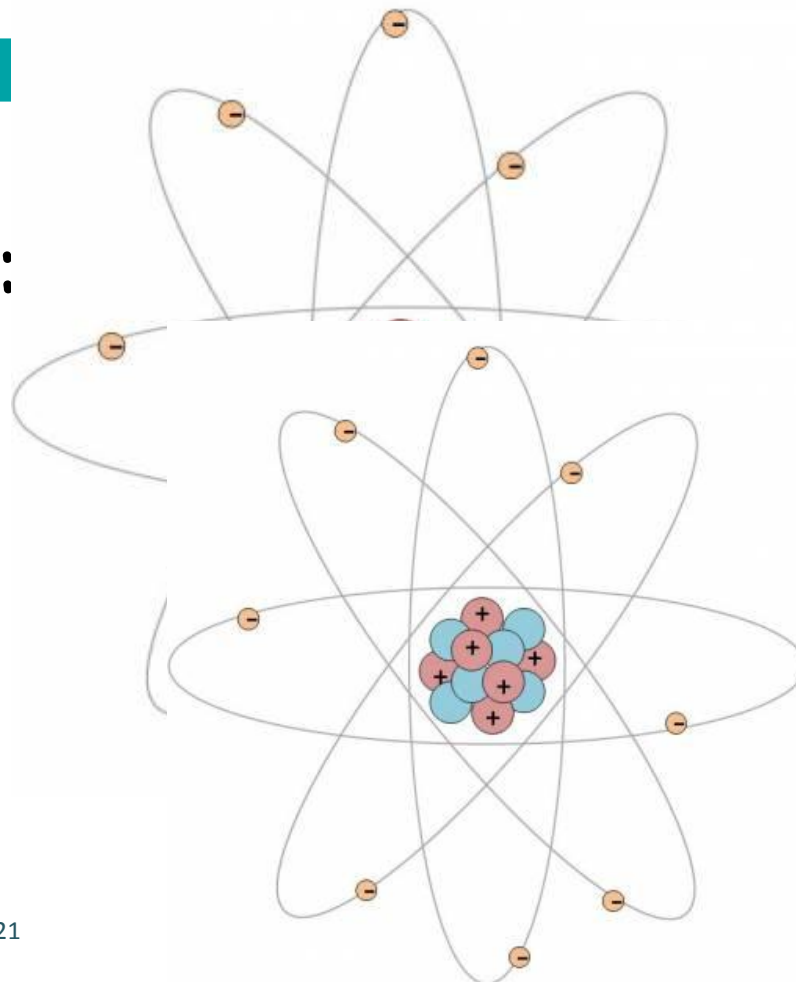
➤ La RMN d'un point de vue  
microscopique

# > L'atome

- Constitué d'un noyau et d'un nuage électronique

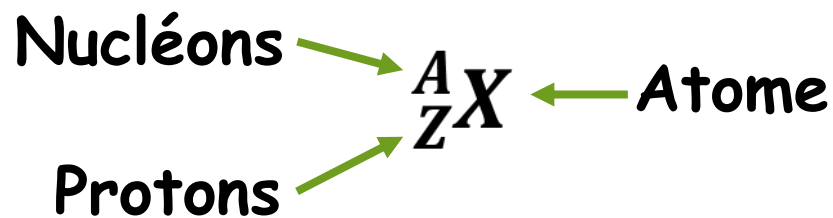


- Noyau:



## > Le spin

- Propriété interne des particules
- Spin = Moment cinétique intrinsèque des particules
- Quel spin nucléaire  $I$  pour quel atome?



A impair alors  $I$  demi-entier

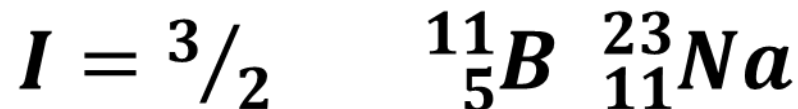
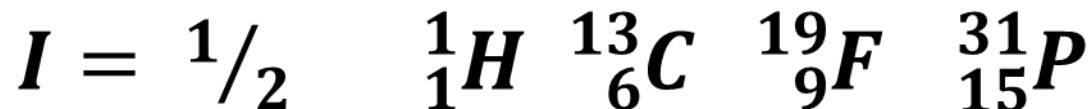
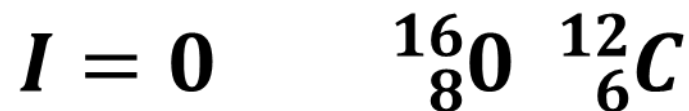
Z pair alors  $I=0$

A pair

Z impair alors  $I$ =entier

## ➤ Spin nucléaire et atomes

- Propriété interne des particules
- Spin = Moment cinétique intrinsèque des particules
- Quel spin nucléaire  $I$  pour quel atome?



## > Spin nucléaire et isotopes

- Même atome mais nombre de neutrons différents

 **Propriétés RMN différentes**

Atome	Abondance naturelle
$^{12}_6\text{C}$	98,9%
$^{13}_6\text{C}$	1,1%
$^{14}_6\text{C}$	Trace

# ➤ Spin et champ magnétique externe

➤ Spin = petit aimant

➤ Champ magnétique externe absent

 **Moment magnétique macro NUL**

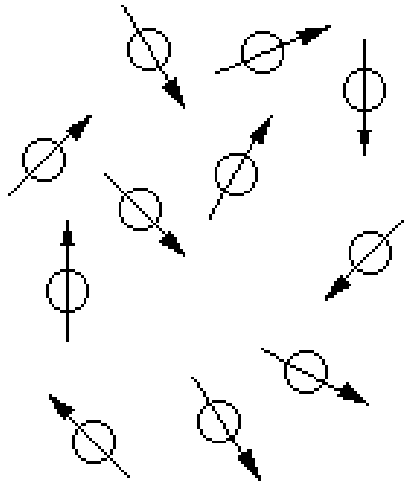
➤ Champ magnétique externe

 **Orientation des spins par rapport au champ magnétique externe**

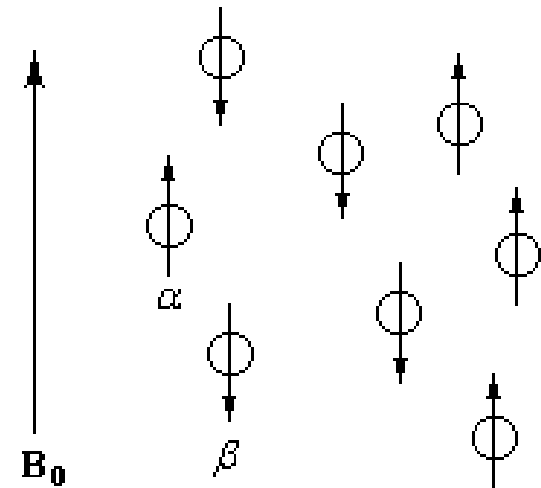


# ➤ Spin et champ magnétique externe

Sans champ magnétique externe

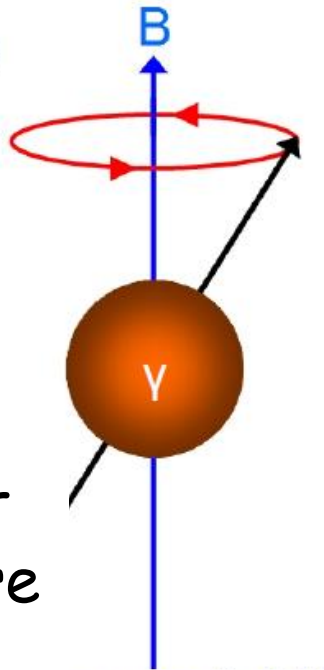


En présence d'un champ magnétique  $B_0$



## ➤ La précession

- Dans un champ magnétique externe  $B_0$ , rotation du spin autour de l'axe de  $B_0$



Moment  
angulaire  
du spin

Précession à la  
fréquence de Larmor

$$\nu_0 = \frac{-\gamma B_0}{2\pi}$$

# ➤ Quelques ordres de grandeurs

➤ Précession dépend de  $B_0$  et du noyau

	Noyaux	$\gamma$ ( $\times 10^6$ $\text{rad.s}^{-1}.\text{T}^{-1}$ )	$B_0$ (T)			
			1,5	3,0	4,7	11,7
Fréquence (MHz)	$^1\text{H}$	267,5				
	$^{13}\text{C}$	67,3				
	$^{31}\text{P}$	108,3				



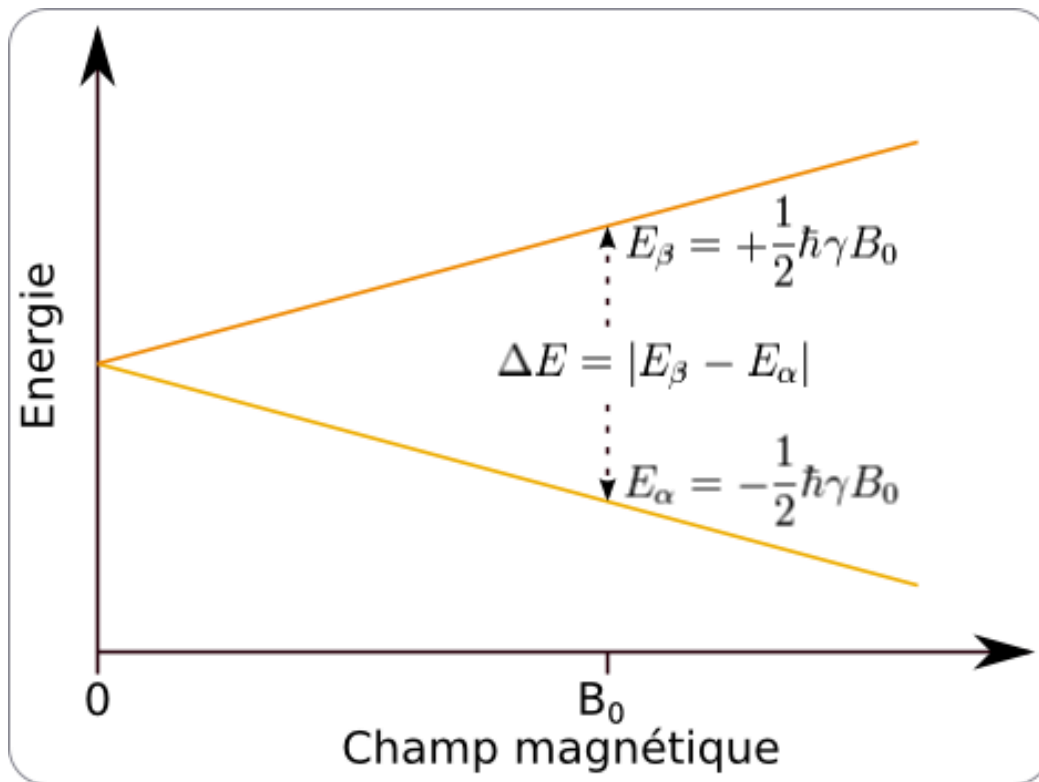
## ➤ Niveaux d'énergie

- Moment cinétique: propriété quantifiée (mécanique quantique)
- Nombre de niveaux d'énergie dépend de  $I$ :  $2I + 1$
- Cas de l'atome  $1H$ 
  - ❖ Spin  $\frac{1}{2}$
  - ❖ 2 niveaux d'énergie  $\alpha$  et  $\beta$



## ➤ Niveaux d'énergie

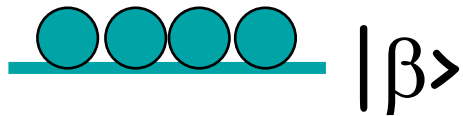
- Levée de dégénérescence des états propres du spin



➔ Effet Zeeman

## ➤ Différence de population

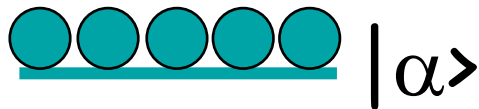
- Exprimée à partir de la distribution de Boltzmann



$$\frac{N_\alpha}{N_\beta} = \exp \frac{-\Delta E}{kT}$$

$k$  = constante de Boltzmann

$$\Delta E = \gamma \hbar \mathbf{B}_0$$



$$\frac{N_\alpha}{N_\beta} = \exp \frac{-\gamma \hbar \mathbf{B}_0}{kT}$$

➔ Sensibilité dépend de  $\mathbf{B}_0$

## ➤ La sensibilité en RMN

- Différence de population entre les 2 états du spin (ici,  $^1\text{H}$ )

$$\frac{N_{\alpha}}{N_{\beta}} = \exp \frac{-\gamma \hbar B_0}{kT}$$

$$k = 1,381 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\hbar = 1,054 \times 10^{-34}$$

T (K)	$\gamma$ ( $\times 10^6$ $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$ )	$B_0$ (T)			
		1,5	3,0	4,7	11,7
4	267,5				
298					

## ➤ La sensibilité en RMN

- Différence de population entre les 2 états du spin (ici,  $^1\text{H}$ )
- 1 atome sur  $\sim 100\,000$  participe au signal RMN
- Dans 18g d'eau,  $6 \times 10^{23}$  atomes





## ➤ En résumé

Les propriétés magnétiques microscopiques d'un noyau (IRM) et son comportement dans un champ magnétique permettent d'obtenir une aimantation macroscopique résiduelle (faible différence de population) de l'échantillon

➔ **Aimantation macroscopique**

## ➤ En résumé

- Sensibilité RMN augmente avec
  - ❖ Intensité du champ magnétique  $B_0$
  - ❖ Rapport gyromagnétique ( $^1\text{H}$  le + élevé)
  - ❖ Abondance naturelle

➔  $^1\text{H}$  a la meilleure sensibilité



INRAE

➤ La RMN d'un point de vue  
macroscopique

## ➤ Une méthode spectroscopique

- Perturbation des populations et observation de leur retour à l'équilibre
- RMN = radiofréquence ( $\lambda \sim m$ )
- Echantillon placé dans  $B_0$ 
  - ❖ Perturbation par une impulsion RF
  - ❖ Enregistrement du signal lors du retour à l'équilibre des spins
  - ❖ Sensibilité  $\propto$  différence de population



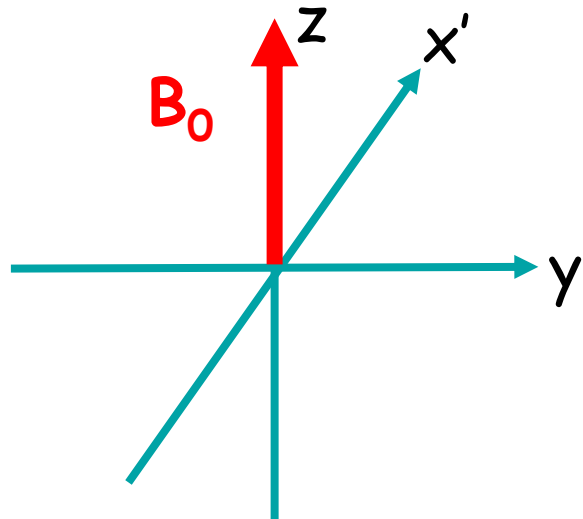
## ➤ Un peu de formalisme

- Représentation vectorielle de l'aimantation macroscopique
- $\mathbf{B}_0$  aligné selon l'axe  $z$
- Repère tournant à la fréquence de Larmor (précession)



## ➤ Un peu de formalisme

- Représentation vectorielle de l'aimantation macroscopique
- $B_0$  aligné selon l'axe  $z$
- Repère tournant à la fréquence de Larmor (précession)

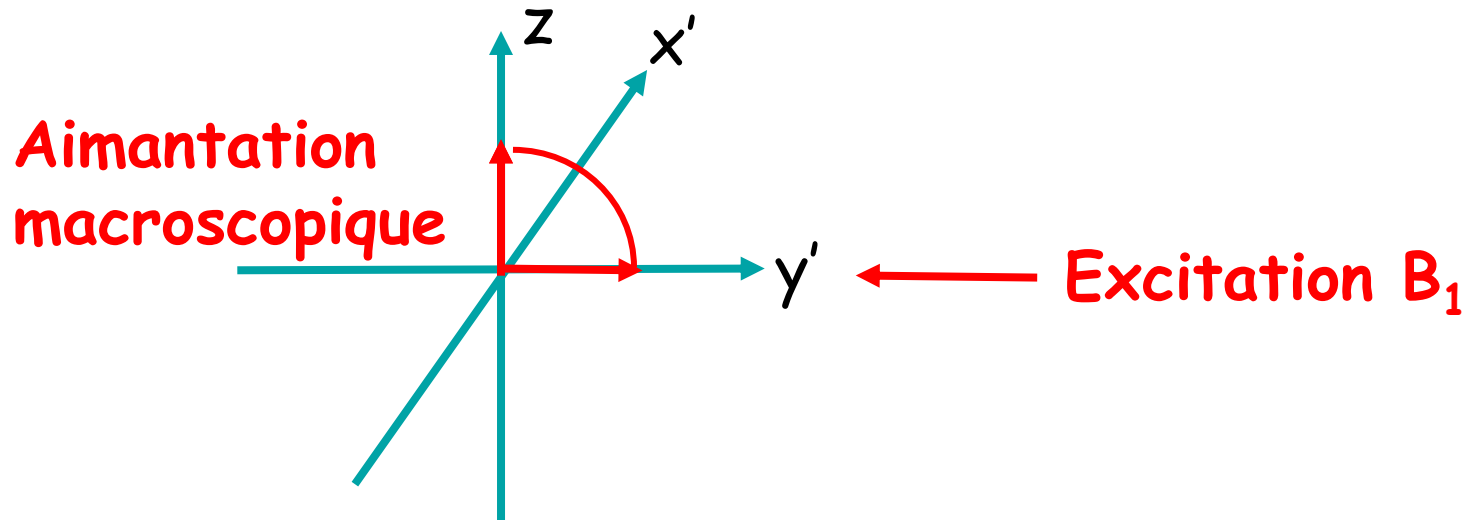


## ➤ Excitation des spins

➤ Impulsion RF du champ d'excitation  $B_1$

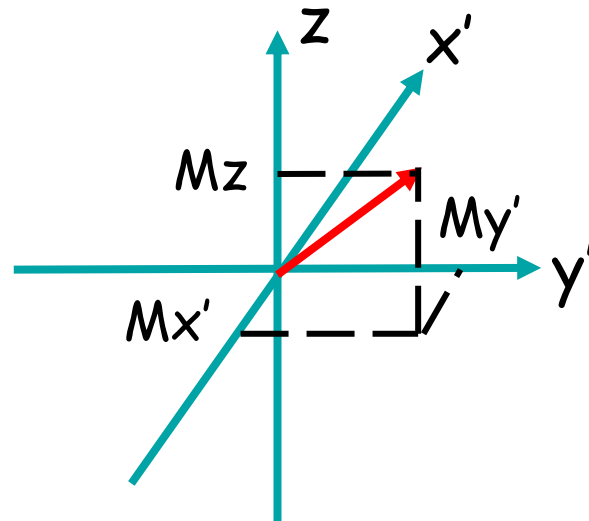
➤  $B_1 \perp B_0$

➤ Transitions entre les niveaux  $\Delta E = \gamma \hbar B_0$



# ➤ Représentation de l'aimantation

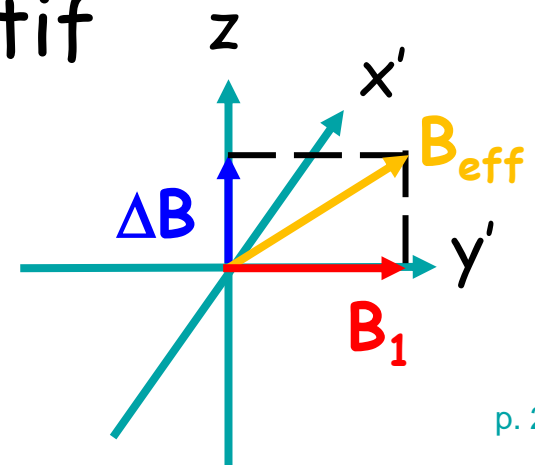
## ➤ Composante de l'aimantation



Longitudinale  $M_z$   
Transversale  $M_{x'y'}$

## ➤ Champ magnétique effectif

$$B_{eff} = \sqrt{B_1^2 + \Delta B^2}$$

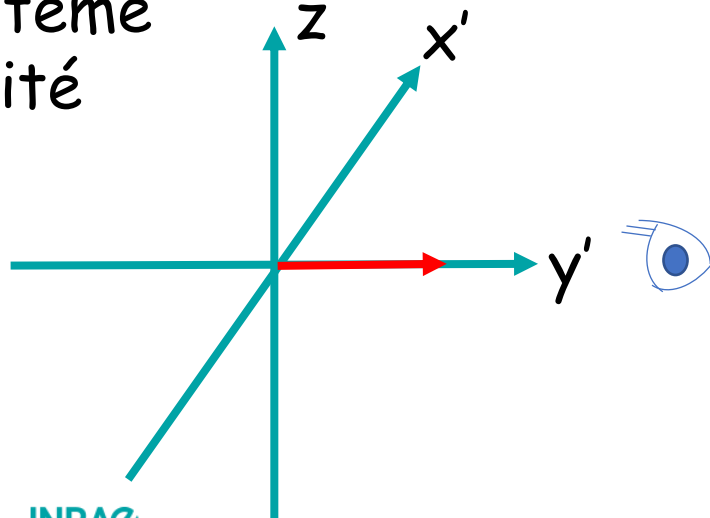




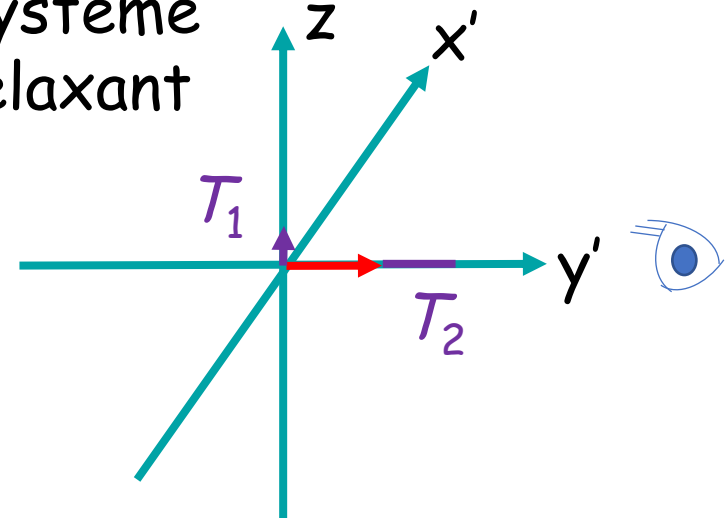
# ➤ Les relaxations en RMN

- Retour à l'équilibre de l'aimantation
- Deux mécanismes de relaxation
  - ❖ Relaxation longitudinale  $T_1$
  - ❖ Relaxation transversale  $T_2$

Système excité



Système relaxant



## ➤ Equations de Bloch & référentiel fixe

- Equations pour calculer l'aimantation macroscopique en fonction du temps
- Formes simplifiées (pas de relaxation)

$$\frac{d\mathbf{M}_x(t)}{dt} = \gamma(\mathbf{M}(t) \times \mathbf{B}(t))_x$$

$$\frac{d\mathbf{M}_y(t)}{dt} = \gamma(\mathbf{M}(t) \times \mathbf{B}(t))_y$$

$$\frac{d\mathbf{M}_z(t)}{dt} = \gamma(\mathbf{M}(t) \times \mathbf{B}(t))_z$$

$$\mathbf{B}(t) = \left( B_x(t), B_y(t), \Delta B_0(t) \right)$$



## ➤ Equations de Bloch & référentiel fixe

- Equations pour calculer l'aimantation macroscopique en fonction du temps
- Formes simplifiées (pas de relaxation)

$$\frac{dM_x(t)}{dt} = \gamma \left( M_y(t)B_z(t) - M_z(t)B_y(t) \right)$$

$$\frac{dM_y(t)}{dt} = \gamma \left( M_z(t)B_x(t) - M_x(t)B_z(t) \right)$$

$$\frac{dM_z(t)}{dt} = \gamma \left( M_x(t)B_y(t) - M_y(t)B_x(t) \right)$$

## ➤ Equations de Bloch & référentiel fixe

- Equations pour calculer l'aimantation macroscopique en fonction du temps
- Avec relaxation

$$\begin{aligned}\frac{dM_x(t)}{dt} &= \gamma \left( M_y(t)B_z(t) - M_z(t)B_y(t) \right) - \frac{M_x(t)}{T_2} \\ \frac{dM_y(t)}{dt} &= \gamma \left( M_z(t)B_x(t) - M_x(t)B_z(t) \right) - \frac{M_y(t)}{T_2} \\ \frac{dM_z(t)}{dt} &= \gamma \left( M_x(t)B_y(t) - M_y(t)B_x(t) \right) - \frac{M_z(t) - M_0}{T_1}\end{aligned}$$

# ➤ Equations de Bloch & référentiel tournant

➤ Référentiel tournant à la vitesse  $\omega$

➤ Fréquence angulaire due à  $B_0$ :  $\omega_0$

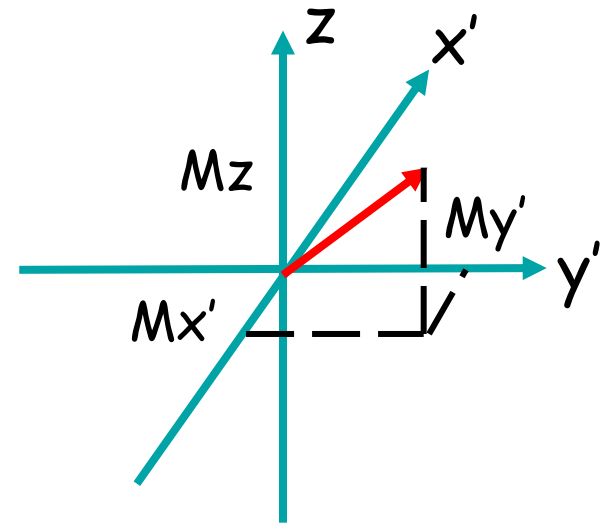
➤  $B_1$  appliqué sur l'axe  $Ox'$

➤ Posons  $\Delta = \omega - \omega_0$   
 $\omega_1 = \gamma B_1$



# ➤ Equations de Bloch & référentiel tournant

$$\frac{dM'_x(t)}{dt} = -\frac{M'_x}{T_2} + \Delta M'_y$$
$$\frac{dM'_y(t)}{dt} = -\frac{M'_y}{T_2} - \Delta M'_x + \omega_1 M_z$$
$$\frac{dM_z(t)}{dt} = -\omega_1 M'_y - \frac{M_z - M_0}{T_1}$$



$$\Delta = \omega - \omega_0$$
$$\omega_1 = \gamma B_1$$





## ➤ Le signal RMN...

- Détection en quadrature: enregistrement de  $M_x$  et  $M_y$
- Signal oscillant (cos pour  $M_y$  et sin pour  $M_x$ )
- Expression du signal

$$M_x(t) = M_0 \cos(\Delta \cdot t) \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right)$$

$$M_y(t) = M_0 \sin(\Delta \cdot t) \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right)$$

$$\Delta = \omega - \omega_0$$



## > ... et sous forme complexe

$$M_{xy}(t) = M_0 \exp\left(i(\Delta \cdot t) - \frac{t}{T_2}\right)$$

$$M_{xy}(t) = M_0 \exp\left(i\phi - \frac{t}{T_2}\right)$$

## ➤ Généralisation temps et l'espace ( $\mathbf{r}$ )

$$S(\mathbf{r}, t) = \rho(\mathbf{r}) \exp(i\phi(\mathbf{r}, t))$$

Démodulation par rapport à  $\omega_0$

$$\phi(\mathbf{r}, t) = \int_0^t [\omega(\mathbf{r}, t') - \omega_0] dt'$$



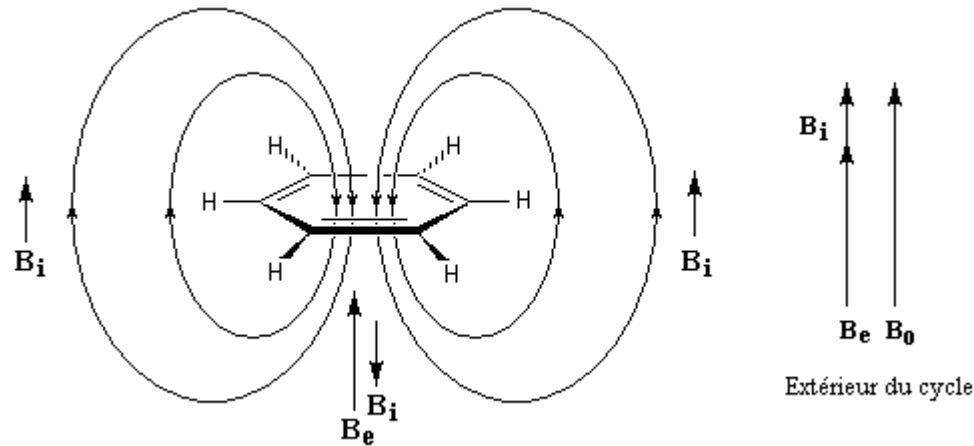
INRAE

➤ Quelques notions RMN



## ➤ Déplacement chimique $\delta$

- Champ magnétique local dépend de la structure chimique: écran électronique



- $\omega \neq \omega_0$

## ➤ Définition de $\delta$

$$\delta = \frac{\nu - \nu_{ref}}{\nu_{travail}}$$

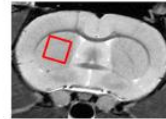
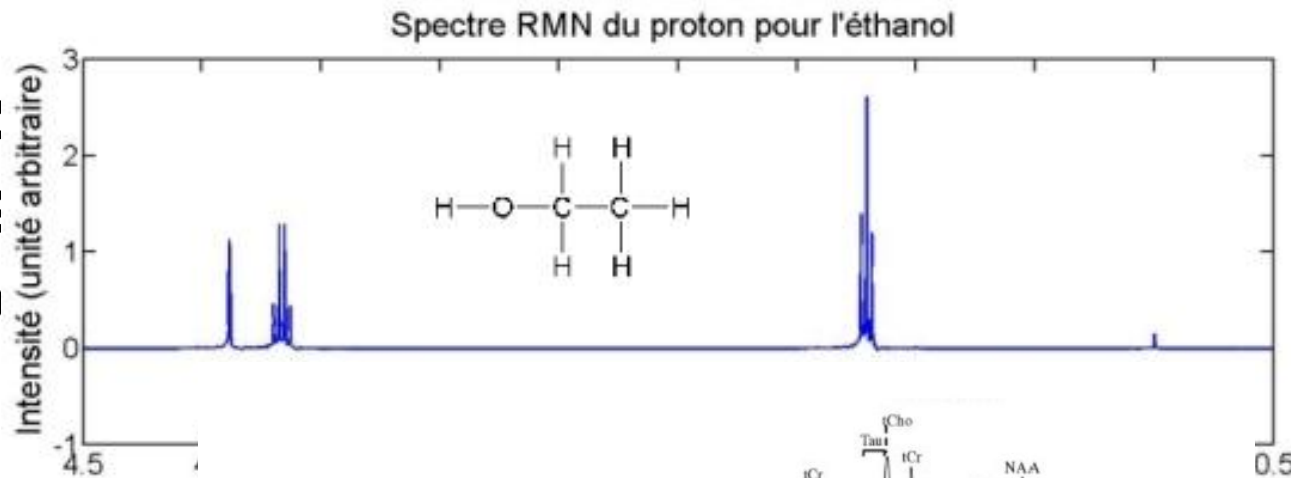
- Valeur de  $\delta$  indépendante de  $B_0$
- Exprimé en ppm

# ➤ Exploitation de $\delta$

➤ Utilisé en spectroscopie RMN (SRM)

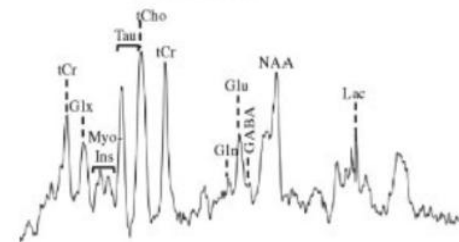
➤ Pe  
me  
co

des  
RM)

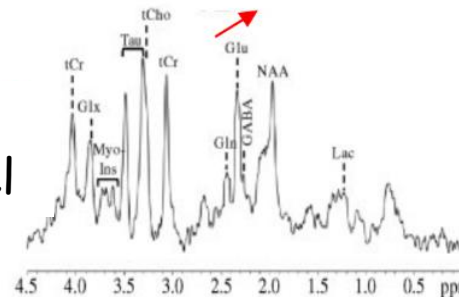


VOI: 8  $\mu$ L  
inside the  
striatum

Sham



Park.  
model



# ➤ Homogénéité du champ magnétique

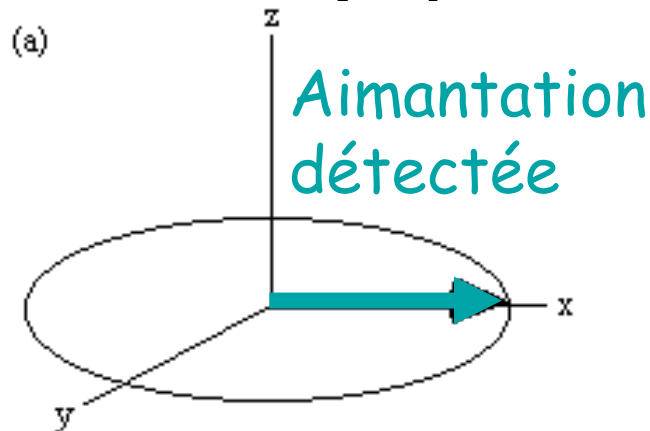
- Différence de précession de l'ordre de quelques Hz (vs fréquence de base en centaines de MHz)
- Champ homogène permet
  - ❖ De résoudre les pics RMN (résolution spectrale)
  - ❖ De conserver le signal (moins de déphasage)



## > Le déphasage

- Dispersion de l'aimantation dans le plan transversal (plan de détection du signal)

## ➔ Diminution de l'aimantation macroscopique



Aimantation détectée

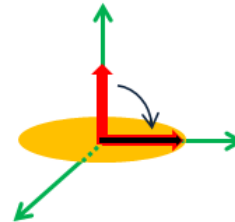




## > Echo de spin

- Un des schémas de base de l'IRM!!

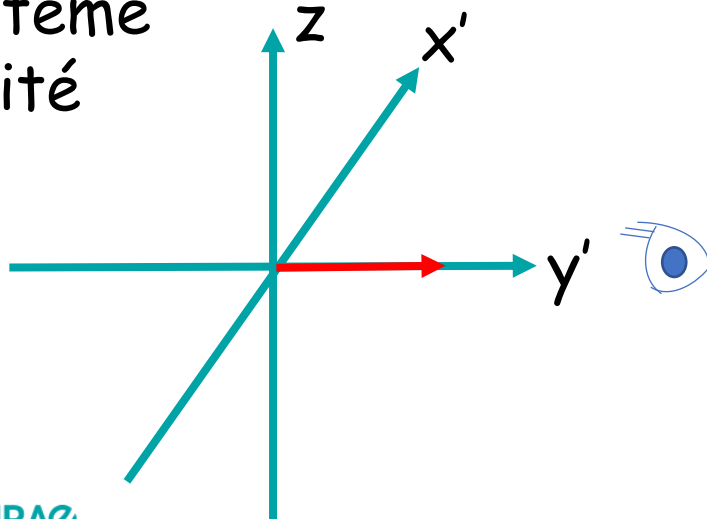
Excitation RF



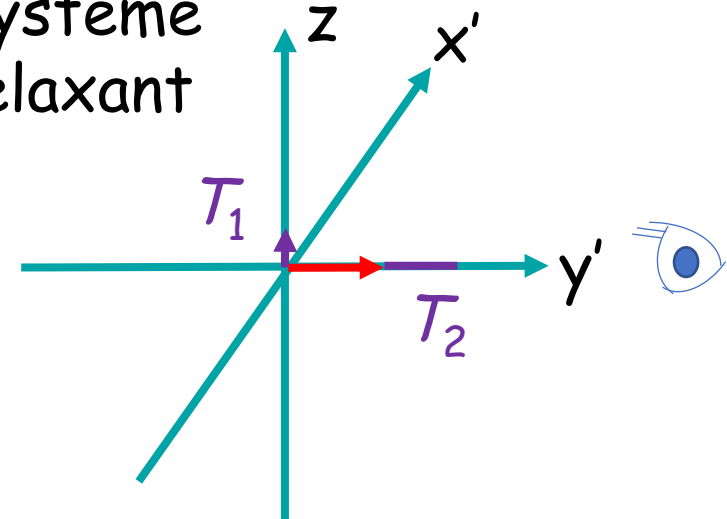
## ➤ Les relaxations

- Relaxation longitudinale  $T_1$ : retour à l'état d'équilibre de l'aimantation
- Relaxation transversale  $T_2$ : perte d'aimantation dans le plan transversal

Systeme  
excité



Systeme  
relaxant



## ➤ Mécanismes de relaxation

### ➤ Relaxation dipolaire

- ❖ Orientation des spins ne change pas par rapport à  $B_0$
- ❖ Position spatiale change à cause de l'agitation thermique

## ➔ Champ magnétique fluctuant

### ➤ Relaxation paramagnétique

- ❖ Présence d'une molécule contenant un  $e^-$
- ❖ Interactions dipolaires  $e^-$ /noyau

## ➤ Quelques challenges

- RMN: Méthode analytique relativement peu sensible
- Imagerie: Signal « découper » dans l'espace



**Comment obtenir assez de signal?**

## ➤ IRM et le vivant

- L'eau est la molécule la plus présente dans le vivant (30-50 M chez l'homme)
- $^1\text{H}_2\text{O}$ 
  - ❖  $\gamma$  et abondance naturelle du  $^1\text{H}$  très élevés (sensibilité)
  - ❖ 2 protons par molécule d'eau

➔ Observation des molécules d'eau

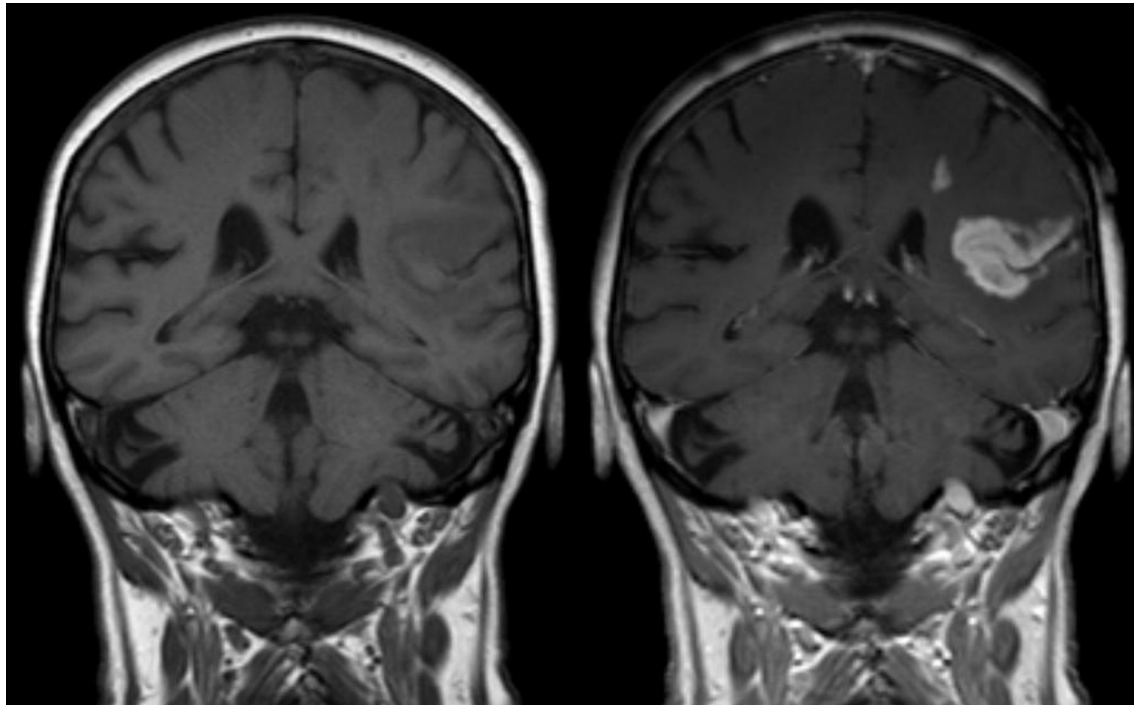


## ➤ Le contraste en IRM

- Contraste apporté par les propriétés magnétiques locales
- Quelques contrastes
  - ❖ Relaxation ( $T_1$ ,  $T_{1\rho}$ ,  $T_2$ ,  $T_2^*$ )
  - ❖ Densité de noyaux
  - ❖ Diffusion

## > Augmenter le contraste

- Injection d'un produit de contraste pour changer sélectivement (localement) les propriétés magnétiques de l'eau d'un tissu



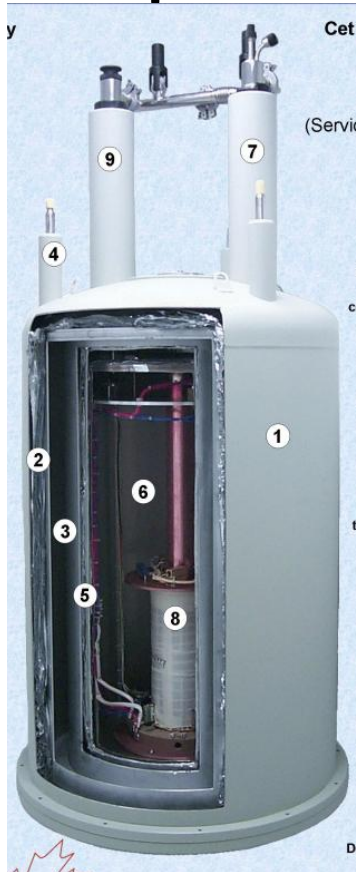
INRAE

➤ Introduction à l'équipement RMN



# ➤ Création de l'aimantation

- Aimants supraconducteurs (bobines à la température de l' $He_1$ )



- Perturber le système et observer le retour à l'équilibre
  - Sondes (bobines) RMN
  - Excitation des spins = Emission
  - Observation du signal = Réception
  - Sondes volumiques et/ou de surface

