

INRAE



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

Guilhem Pagés

INRAE

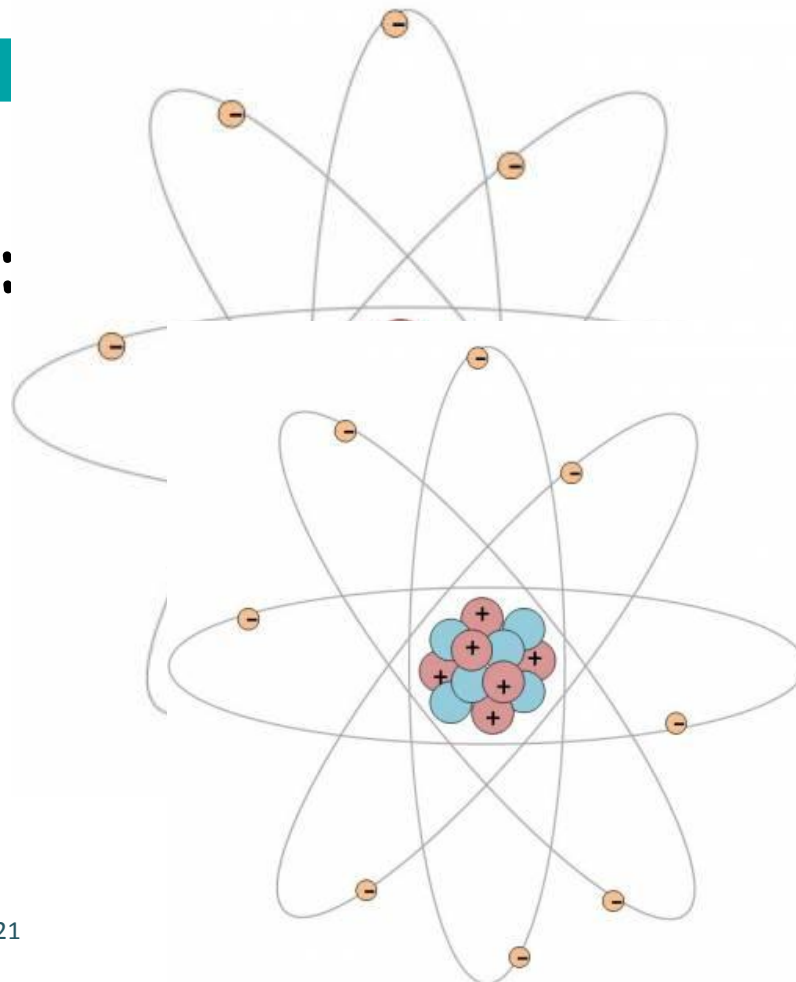
➤ La RMN d'un point de vue
microscopique

> L'atome

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

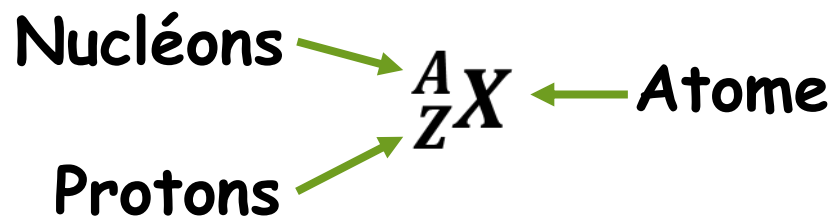


- Noyau:



> 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

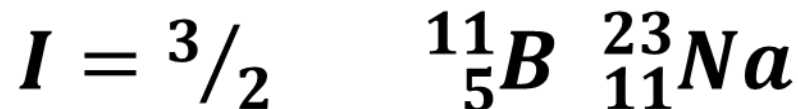
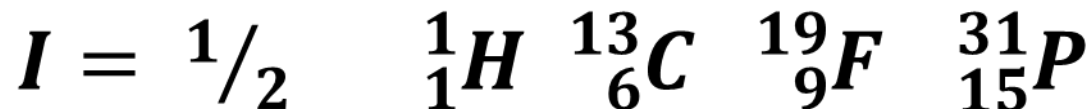
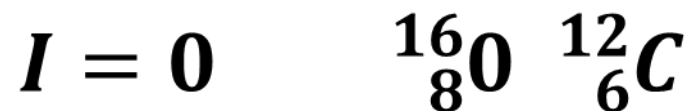
Z pair alors $I=0$

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

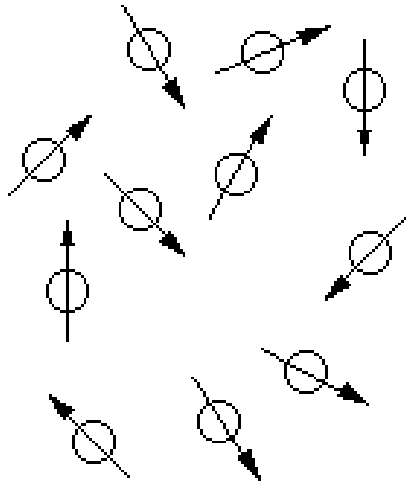
 **Moment magnétique macro NUL**

➤ Champ magnétique externe

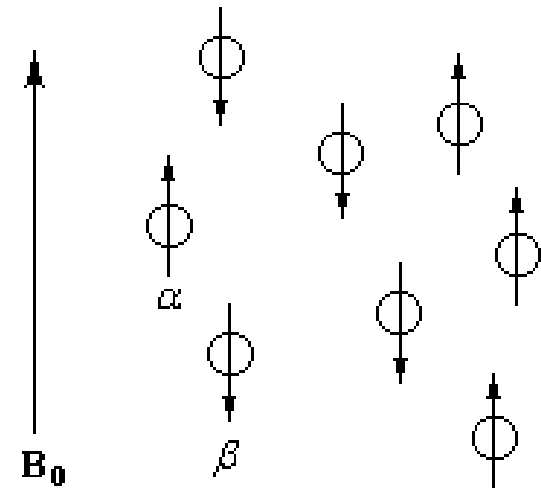
 **Orientation des spins par rapport au champ magnétique externe**

➤ Spin et champ magnétique externe

Sans champ magnétique externe

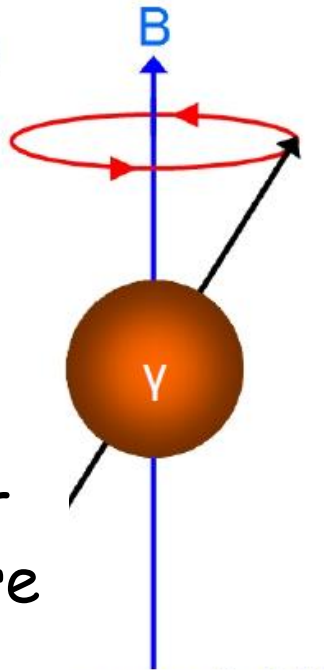


En présence d'un champ magnétique B_0



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

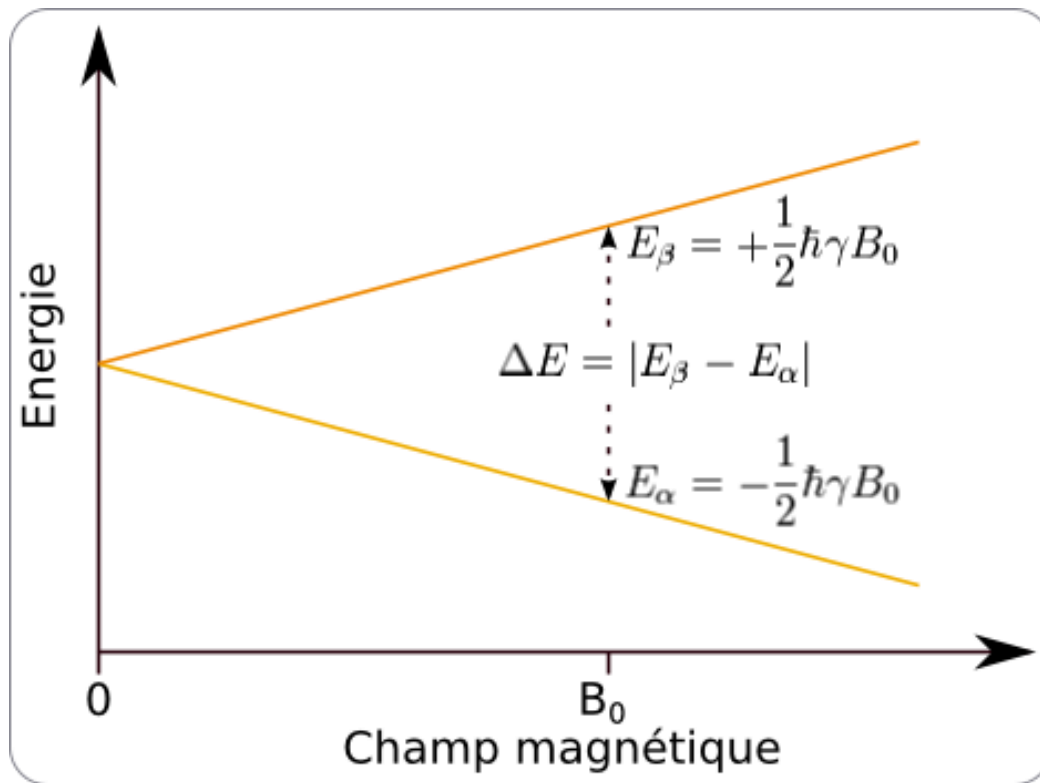


➤ Niveaux d'énergie

- 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 α et β

➤ Niveaux d'énergie

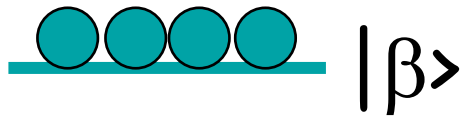
- Levée de dégénérescence des états propres du spin



➔ Effet Zeeman

➤ Différence de population

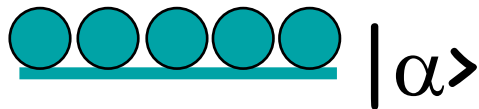
- Exprimée à partir de la distribution de Boltzmann



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

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, ^1H)

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

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

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

T (K)	γ ($\times 10^6$ $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$)	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, ^1H)
- 1 atome sur $\sim 100\,000$ participe au signal RMN
- Dans 18g d'eau, 6×10^{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 (^1H le + élevé)
 - ❖ Abondance naturelle

➔ ^1H 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



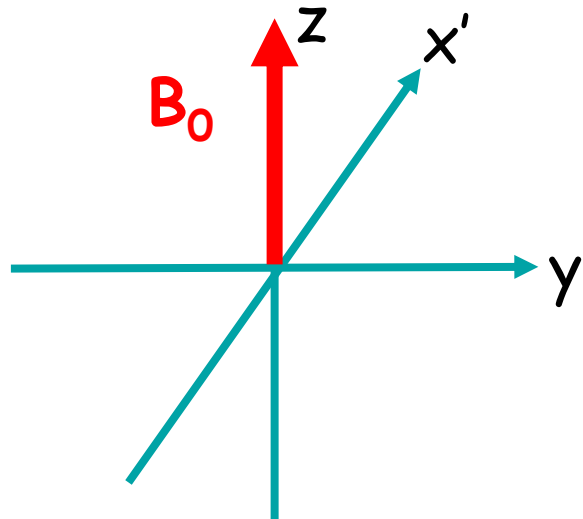
➤ Un peu de formalisme

- 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)

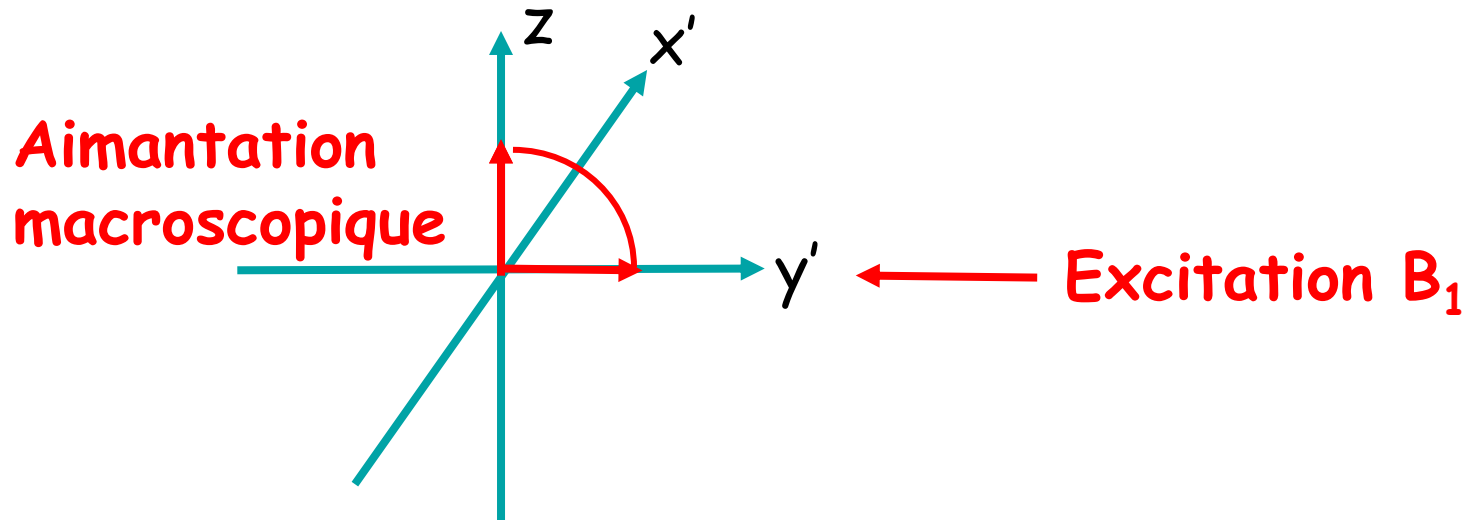


➤ Excitation des spins

➤ Impulsion RF du champ d'excitation B_1

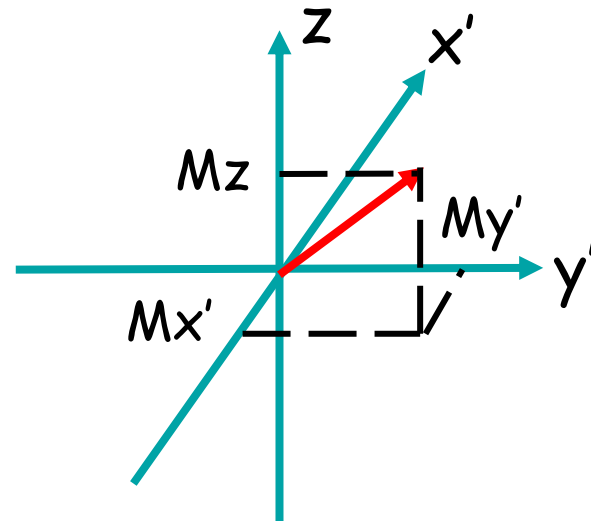
➤ $B_1 \perp B_0$

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



➤ Représentation de l'aimantation

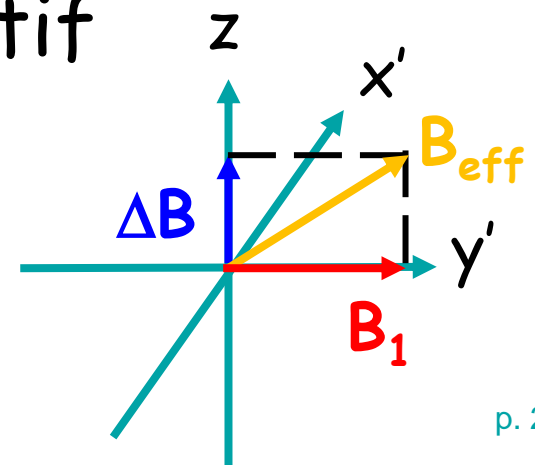
➤ Composante de l'aimantation



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

➤ Champ magnétique effectif

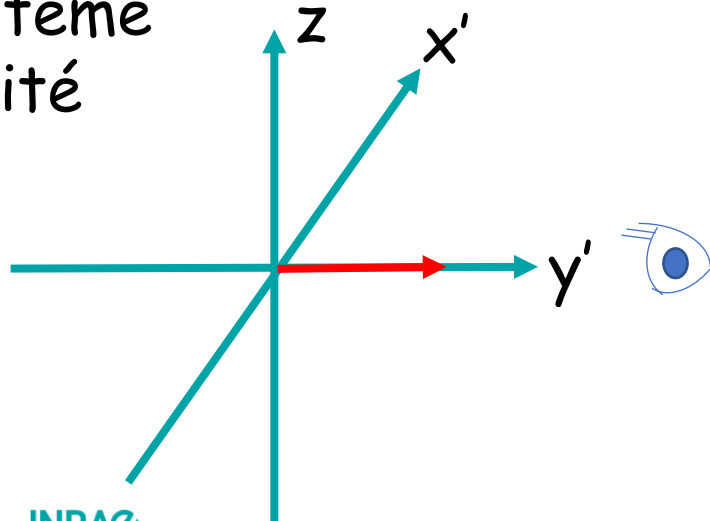
$$B_{eff} = \sqrt{B_1^2 + \Delta B^2}$$



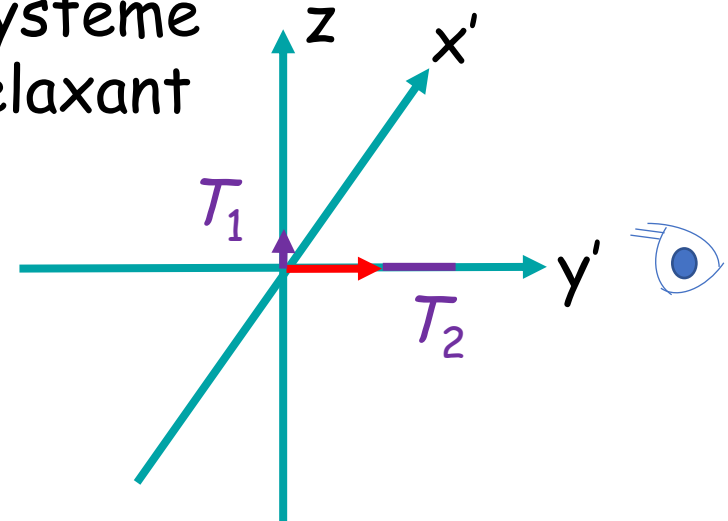
➤ Les relaxations en RMN

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

Systeme
excité



Systeme
relaxant



➤ Equations de Bloch & référentiel fixe

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

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

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

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

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



➤ 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 ω

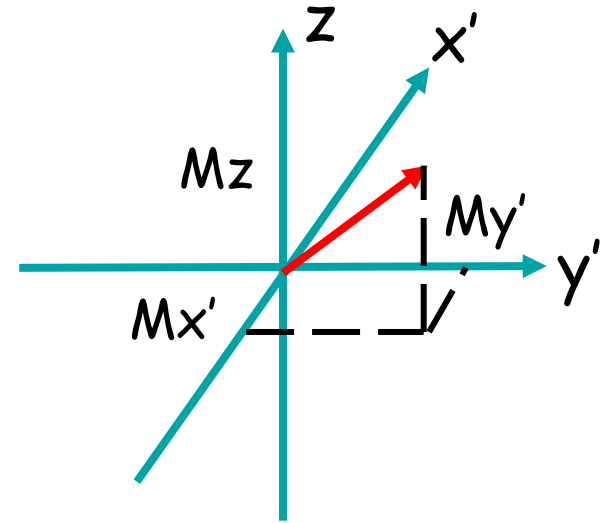
➤ Fréquence angulaire due à B_0 : ω_0

➤ B_1 appliqué sur l'axe Ox'

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

➤ Equations de Bloch & référentiel tournant

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

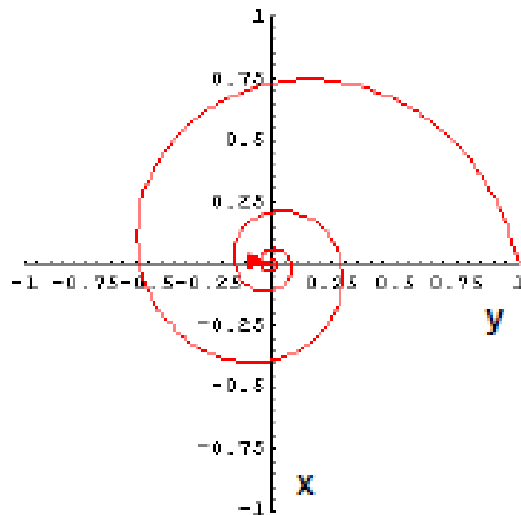


$$\Delta = \omega - \omega_0$$
$$\omega_1 = \gamma B_1$$



➤ Le signal RMN

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



➤ 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 ω_0

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



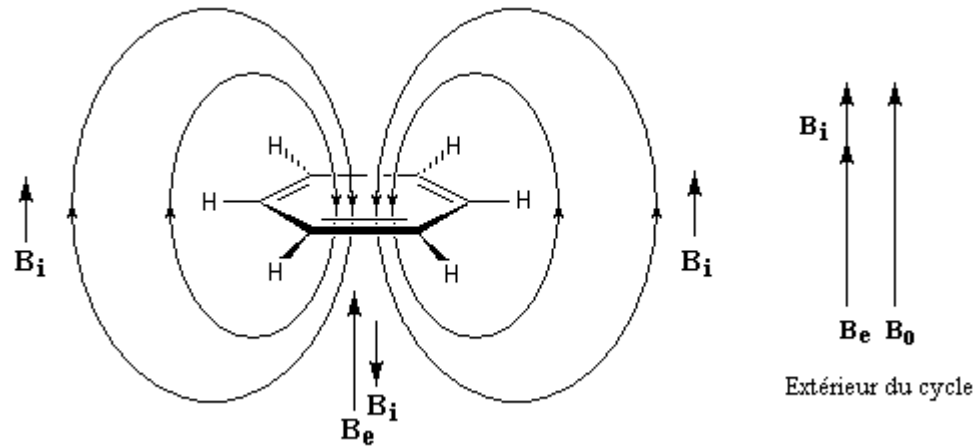
INRAE

➤ Quelques notions RMN



➤ Déplacement chimique δ

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



- $\omega \neq \omega_0$

➤ Définition de δ

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

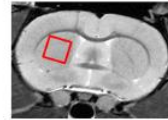
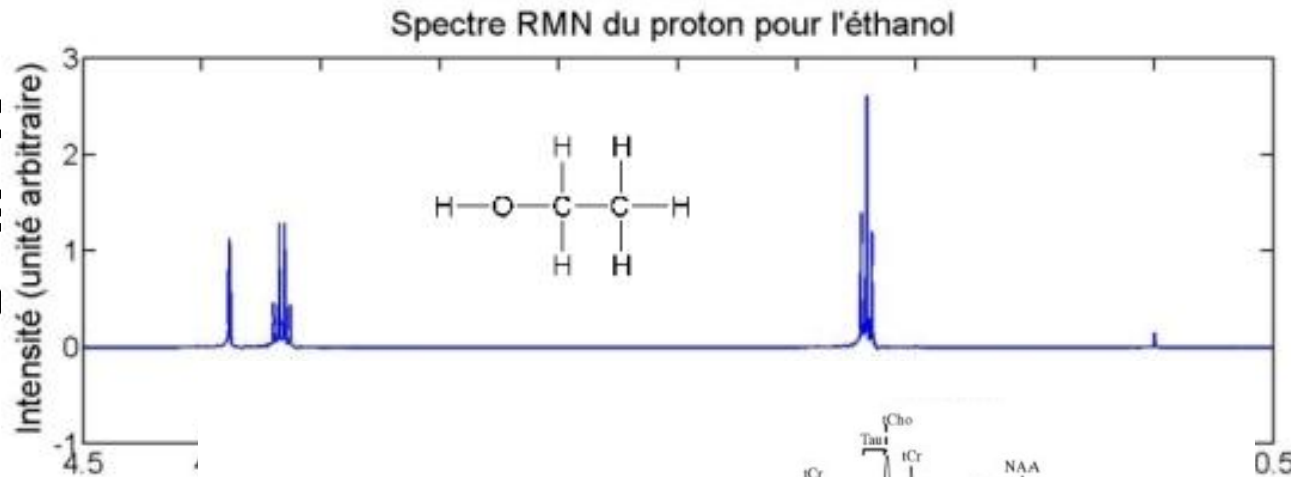
- Valeur de δ indépendante de B_0
- Exprimé en ppm

➤ Exploitation de δ

➤ Utilisé en spectroscopie RMN (SRM)

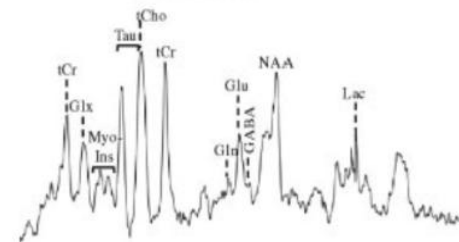
➤ Pe
me
co

des
RM)

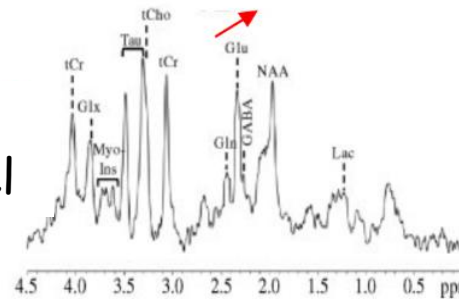


VOI: 8 μ L
inside the
striatum

Sham



Park.
model



➤ Homogénéité du champ magnétique

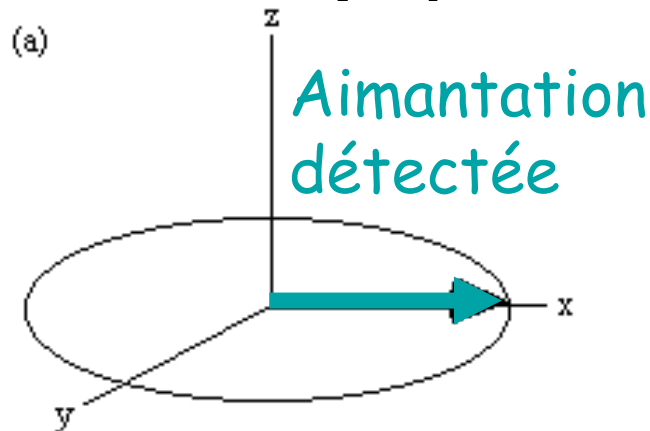
- Différence de précession de l'ordre de quelques Hz (vs fréquence de base en centaines de MHz)
- Champ homogène permet
 - ❖ De résoudre les pics RMN (résolution spectrale)
 - ❖ De conserver le signal (moins de déphasage)



➤ Le déphasage

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

➔ Diminution de l'aimantation macroscopique



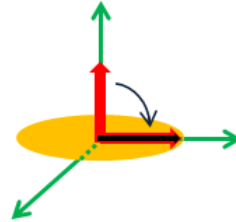
Aimantation détectée



> Echo de spin

- Un des schémas de base de l'IRM!!

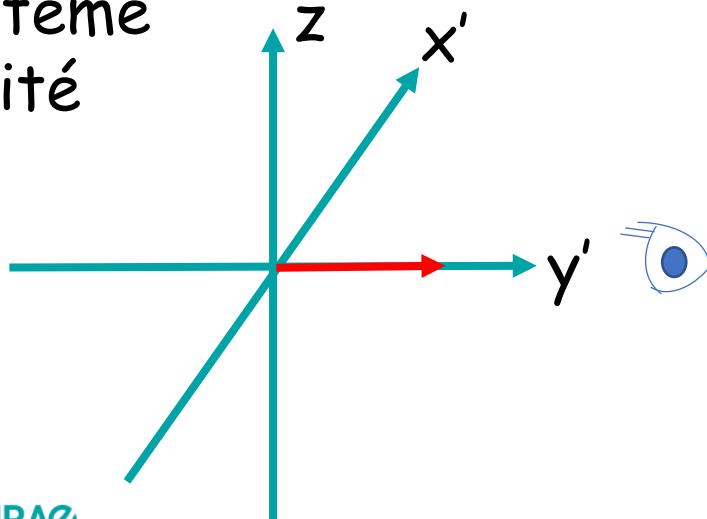
Excitation RF



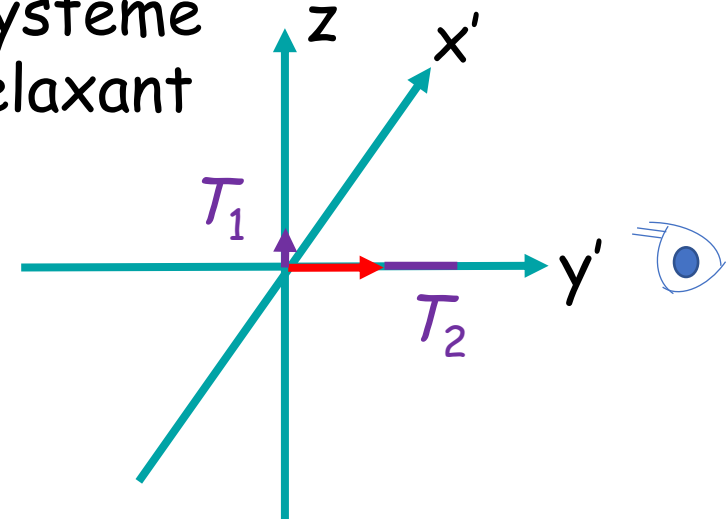
➤ Les relaxations

- 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)
- $^1\text{H}_2\text{O}$
 - ❖ γ et abondance naturelle du ^1H très élevés (sensibilité)
 - ❖ 2 protons par molécule d'eau

➔ Observation des molécules d'eau

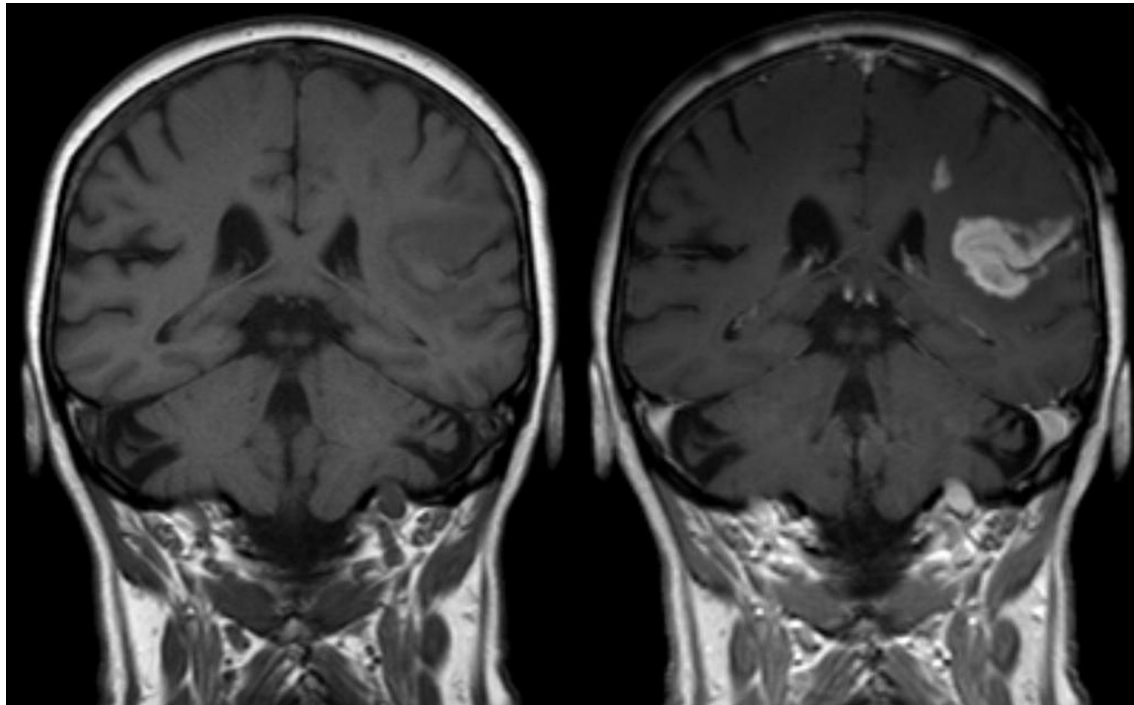


➤ Le contraste en IRM

- 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

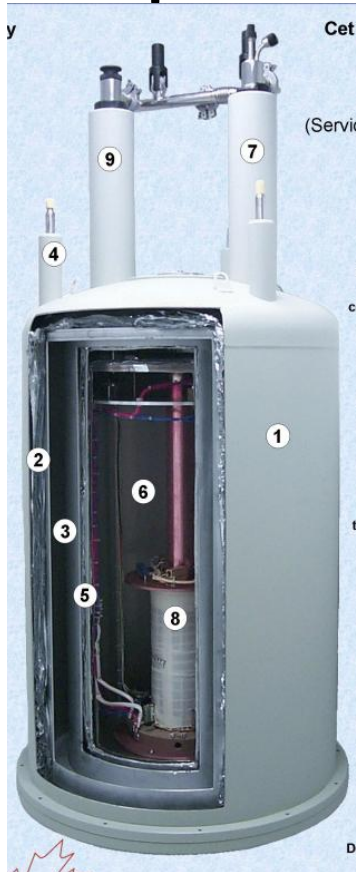


INRAE

➤ 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

