

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-03238790

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

AgroResonance

Plateforme RMN pour l'agronomie, l'agro-alimentaire et la nutrition

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

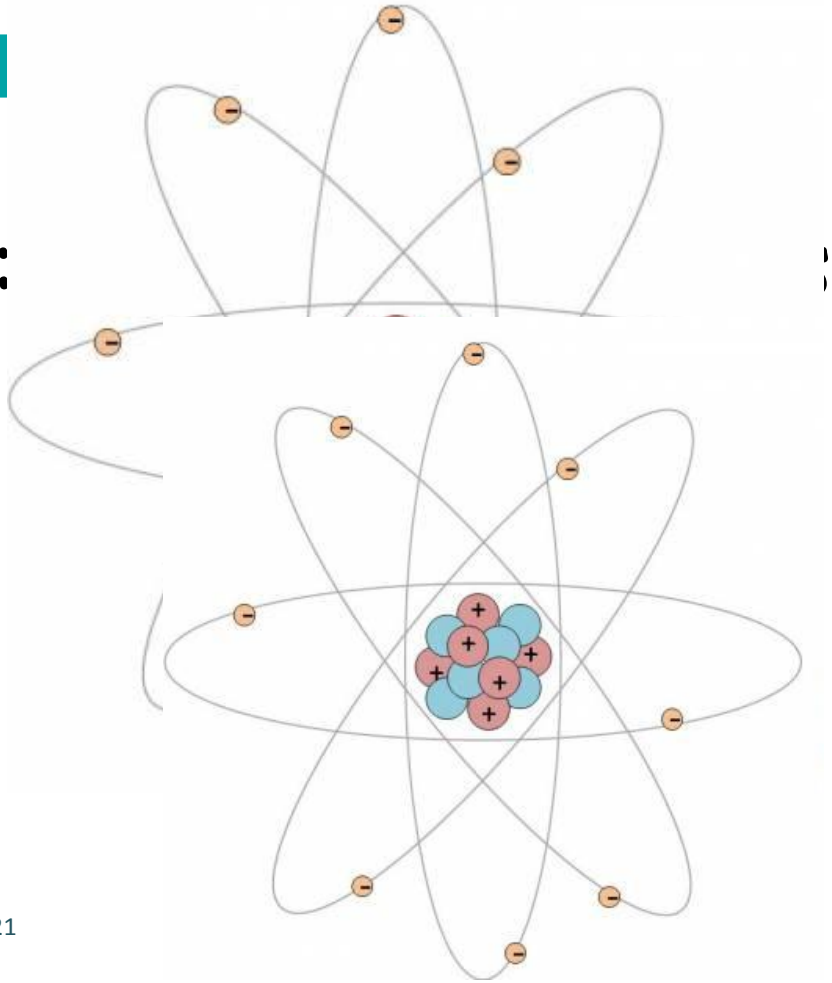
Guilhem Pagés

La RMN d'un point de vue microscopique

L'atome

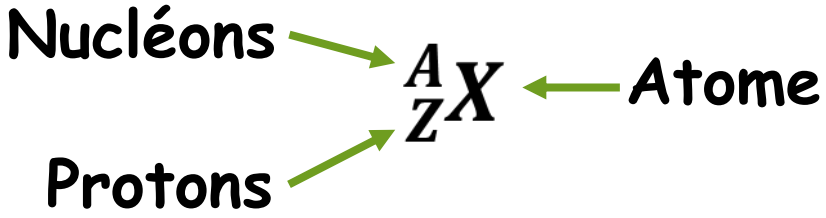
- Constitué d'un noyau et d'un nuage électronique

- 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

A pair
- Z pair alors I=0
- 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?

$I = 0$ $\quad {}^{16}_{8}O$ $\ {}^{12}_{6}C$

$I = {}^{1}/_{2}$ $\quad {}^{1}_{1}H$ $\ {}^{13}_{6}C$ $\ {}^{19}_{9}F$ $\ {}^{31}_{15}P$

$I = 1$ $\quad {}^{2}_{1}H$ $\ {}^{14}_{7}N$

$I = {}^{3}/_{2}$ $\quad {}^{11}_{5}B$ $\ {}^{23}_{11}Na$

Spin nucléaire et isotopes

- Même atome mais nombre de neutrons différents

Propriétés RMN différentes

Atome	Abondance naturelle
$^{12}_{6}C$	98,9%
$^{13}_{6}C$	1,1%
$^{14}_{6}C$	Trace

Spin et champ magnétique externe

- Spin = petit aimant

- Champ magnétique externe absent

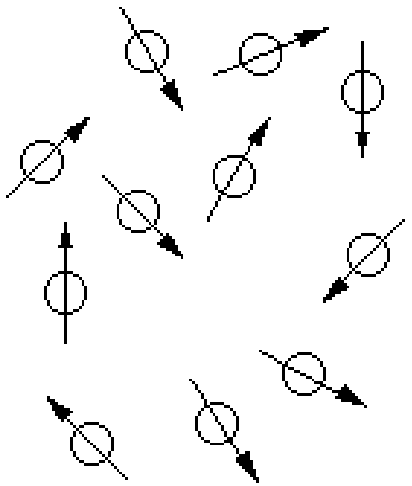
  → **Moment magnétique macro NUL**

- Champ magnétique externe

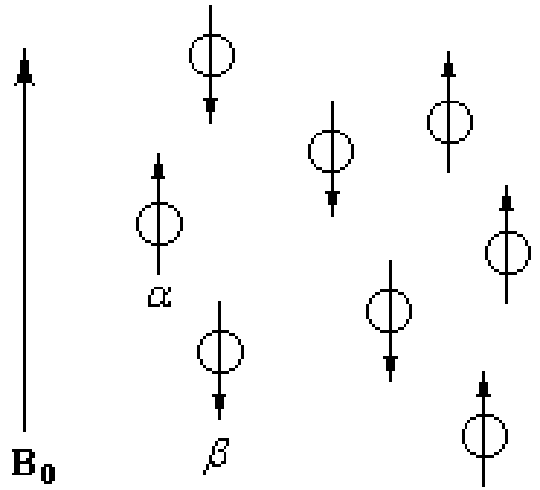
  → **Orientation des spins par rapport au champ magnétique externe**

Spin et champ magnétique externe

Sans champ magnétique externe

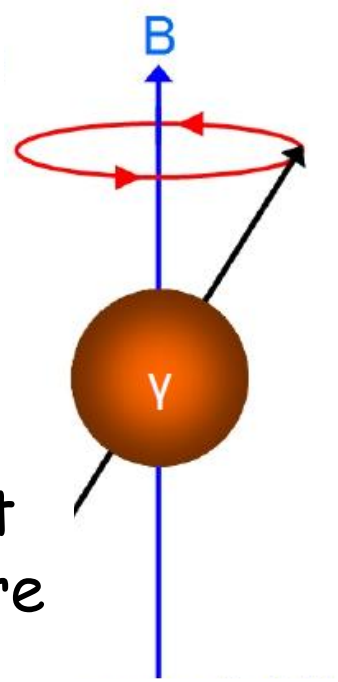


En présence d'un champ magnétique $\mathbf{B}_0$



La précession

- Dans un champ magnétique externe $\mathbf{B}_0$, rotation du spin autour de l'axe de $\mathbf{B}_0$



Moment angulaire du spin

Précession à la fréquence de Larmor

$$v_0 = \frac{-\gamma B_0}{2\pi}$$

Quelques ordres de grandeurs

- Précession dépend de B_0 et du noyau

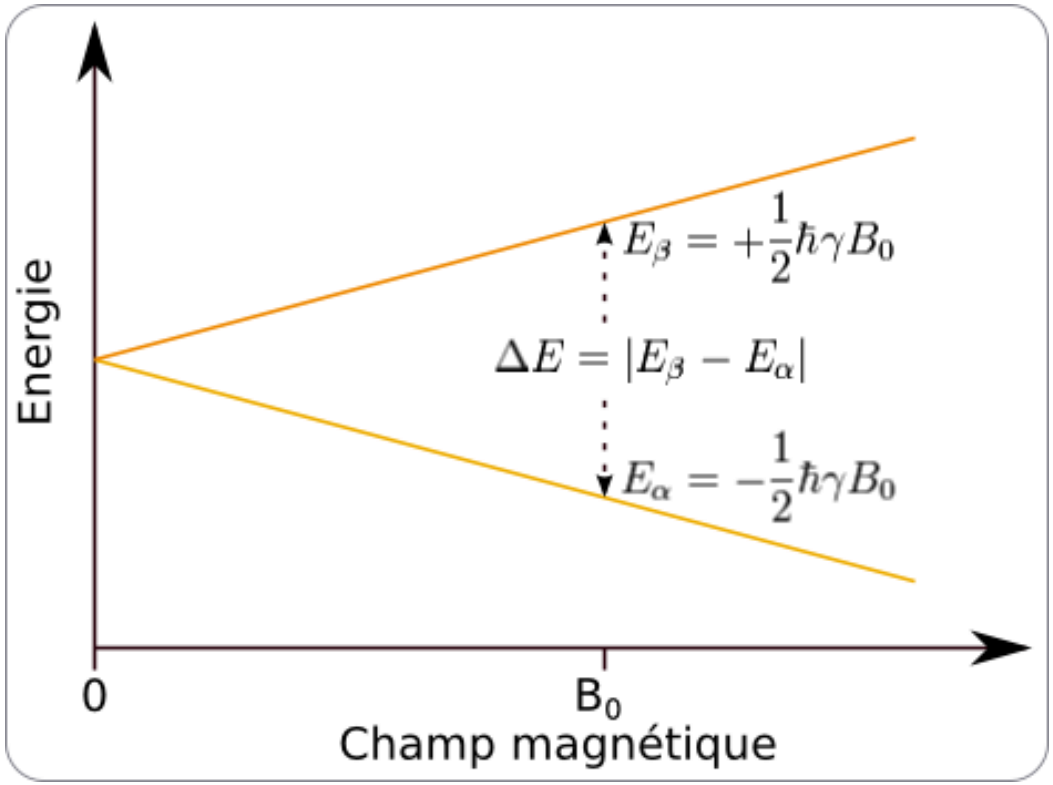
	Noyaux	γ ($\times 10^6$ rad.s^{-1}.T^{-1})	B_0 (T)			
			1,5	3,0	4,7	11,7
Fréquence (MHz)	^{1}H	267,5				
	^{13}C	67,3				
	^{31}P	108,3				

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

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



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

➡ 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= 1,381x10^{-23} m^2.kg.s^{-2}.K^{-1}
ħ= 1,054x10^{-34}

T (K)	γ (x10^6 rad.s^{-1}.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}H)
- 1 atome sur ~100 000 participe au signal RMN
- Dans 18g d'eau, $6x10^{23}$ 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 $\mathbf{B_0}$
  - Rapport gyromagnétique (^{1}H le + élevé)
  - Abondance naturelle

^{1}H a la meilleure sensibilité

La RMN d'un point de vue macroscopique

Une méthode spectroscopique

- Perturbation des populations et observation de leur retour à l'équilibre
- RMN = radiofréquence (λ~m)
- Echantillon placé dans $\mathbf{B}_0$
  - Perturbation par une impulsion RF
  - Enregistrement du signal lors du retour à l'équilibre des spins
  - Sensibilité ∞ différence de population

Un peu de formalisme

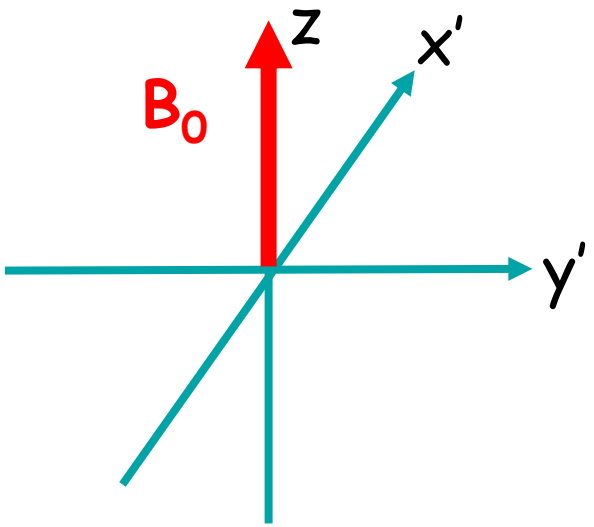
- Représentation vectorielle de l'aimantation macroscopique
- $\mathbf{B}_0$ aligné selon l'axe z
- Repère tournant à la fréquence de Larmor (précession)





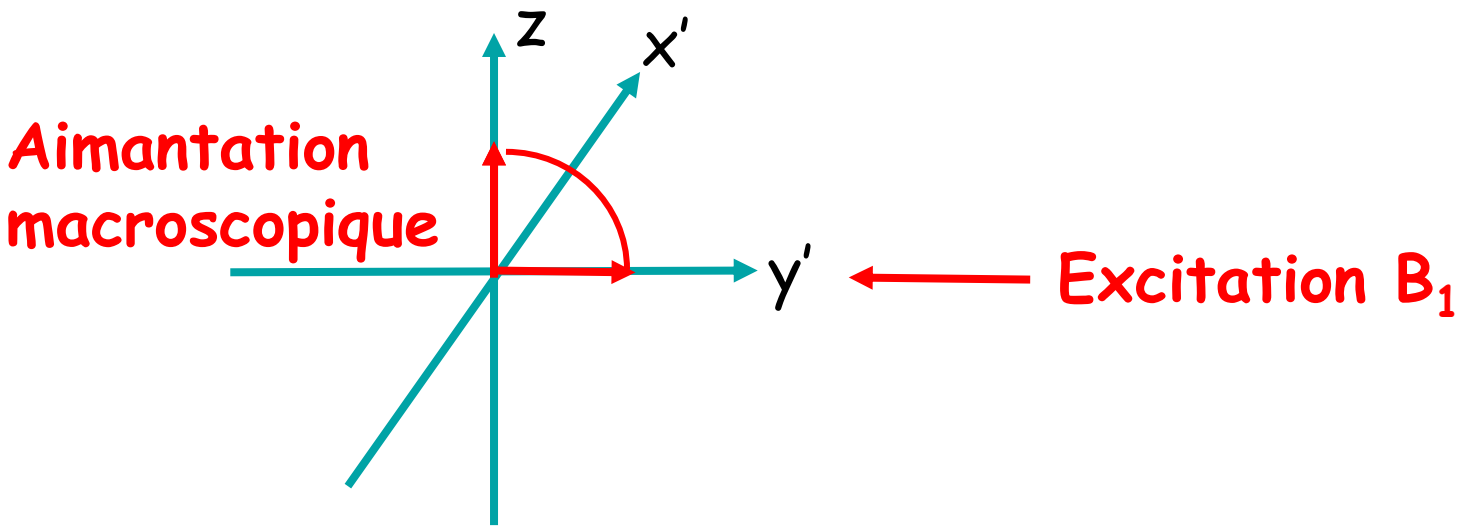
Un peu de formalisme

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



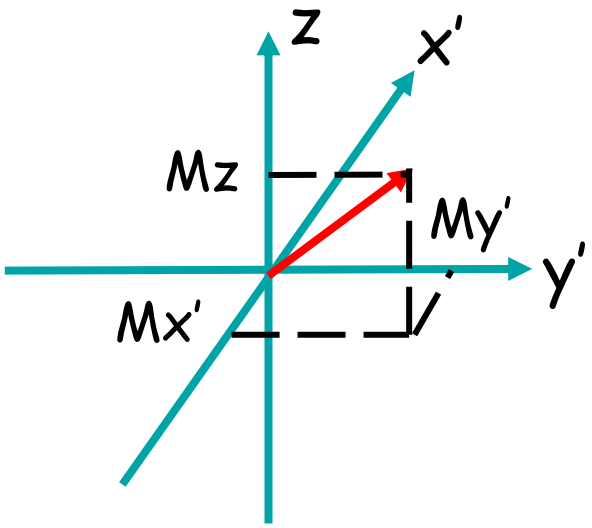
Excitation des spins

- Impulsion RF du champ d'excitation **B1**
- $B_1 \perp B_0$
- Transitions entre les niveaux $\Delta E = \gamma \hbar B_0$



Représentation de l'aimantation

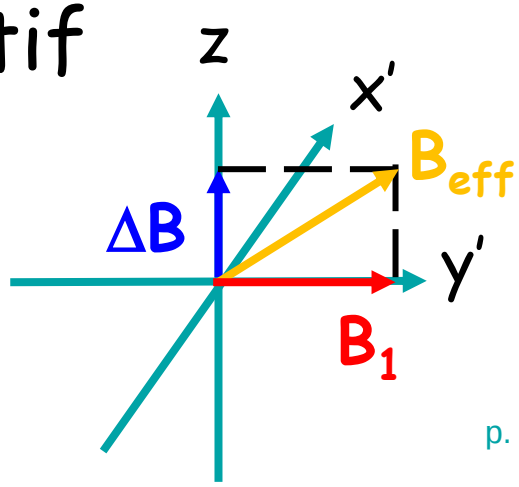
Composante de l'aimantation



Longitudinale Mz
Transversale Mx'y'

Champ magnétique effectif

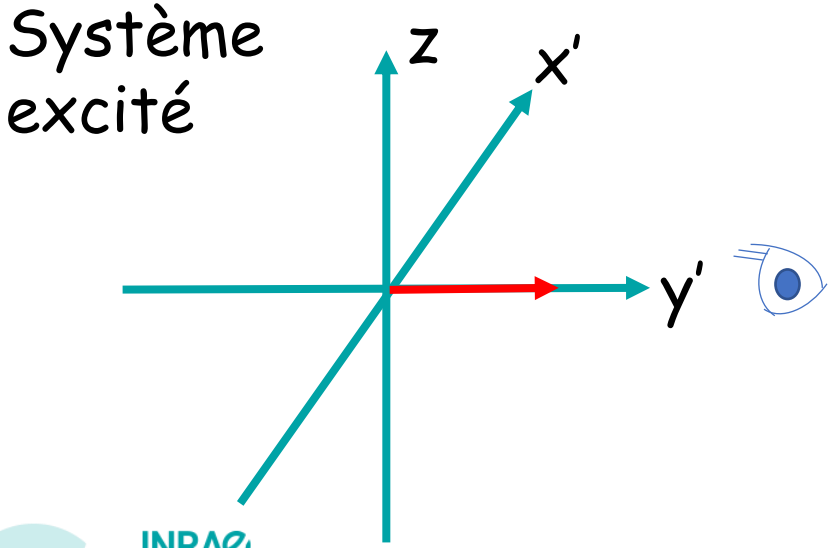
$$B_{eff} = \sqrt{B_1^2 + \Delta B^2}$$

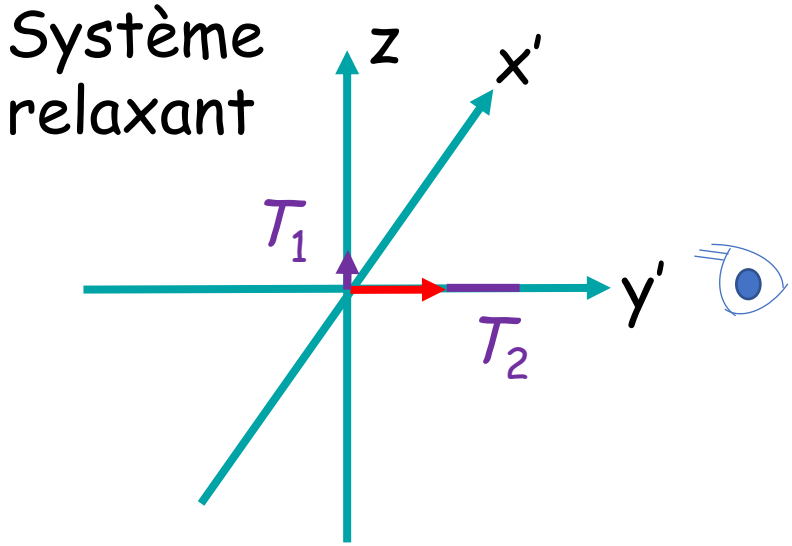


Les relaxations en RMN

- Retour à l'équilibre de l'aimantation

- Deux mécanismes de relaxation
  - Relaxation longitudinale T_1
  - Relaxation transversale T_2





Equations de Bloch & référentiel fixe

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

- Formes simplifiées (pas de relaxation)

$$\frac{d\boldsymbol{M}_x(t)}{dt} = \gamma\big(\boldsymbol{M}(t) \times \boldsymbol{B}(t)\big)_x$$
$$\frac{d\boldsymbol{M}_y(t)}{dt} = \gamma\big(\boldsymbol{M}(t) \times \boldsymbol{B}(t)\big)_y$$
$$\frac{d\boldsymbol{M}_z(t)}{dt} = \gamma\big(\boldsymbol{M}(t) \times \boldsymbol{B}(t)\big)_z$$

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

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

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

Equations de Bloch & référentiel tournant

- Référentiel tournant à la vitesse ω
- Fréquence anglulaire due à $\mathbf{B}_0$: ω_0
- $\mathbf{B}_1$ appliqué sur l'axe Ox'
- Posons $\Delta = \omega - \omega_0$

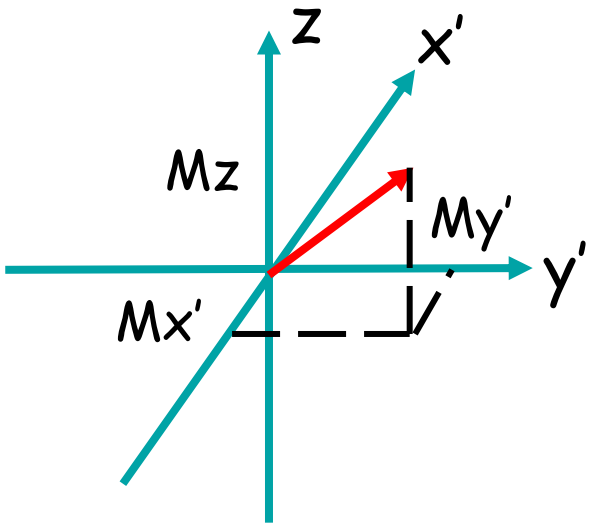
$$\omega_1 = \gamma B_1$$

Equations de Bloch & référentiel tournant

$$\frac{dM'_x(t)}{dt} = -\frac{M'_x}{T_2} + \Delta M'_y$$

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

$$\frac{dM_z(t)}{dt} = -\omega_1 M'_y - \frac{M_z - M_0}{T_1}$$



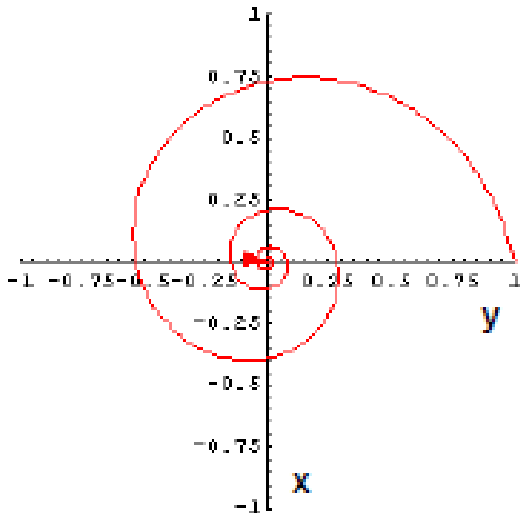
$$\Delta = \omega - \omega_0$$

$$\omega_1 = \gamma B_1$$

Le signal RMN

- Détection en quadrature: enregistrement de M_x et M_y

- Signal oscillant (cos pour My et sin pour M_x)



Le signal RMN…

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

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

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

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

… et sous forme complexe

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

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

Généralisation temps et l'espace (r)

$$S(\boldsymbol{r},t) = \rho(\boldsymbol{r})exp\left(i\emptyset(\boldsymbol{r},t)\right)$$

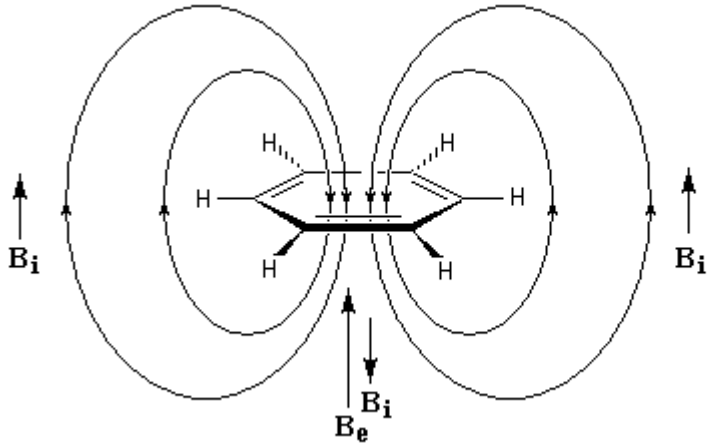
Démodulation par rapport à ω_0

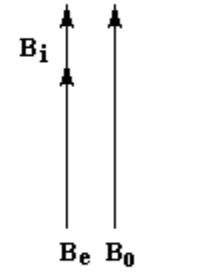
$$\emptyset(\boldsymbol{r},t) = \int_0^t [\omega(\boldsymbol{r},t') - \omega_0]dt'$$

Quelques notions RMN

Déplacement chimique δ

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





- $\omega \neq \omega_0$

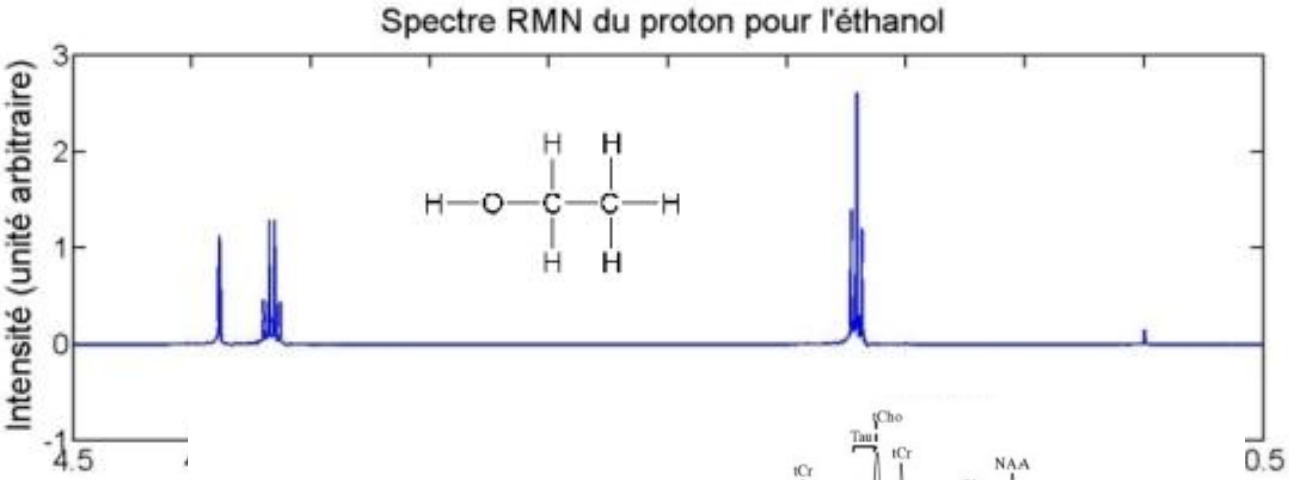
Définition de δ

$$\delta = \frac{\vartheta - \vartheta_{ref}}{\vartheta_{travail}}$$

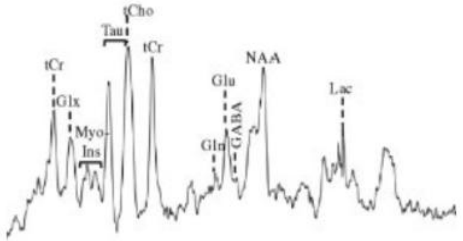
- Valeur de δ indépendante de $\mathbf{B}_0$
- Exprimé en ppm

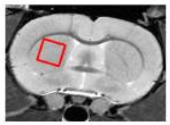
Exploitation de δ

- Utilisé en spectroscopie RMN (SRM)
- Pe… des
  me…
  co… RM)



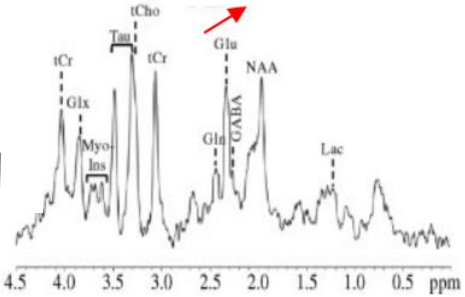
Sham





VOI: 8 µL inside the striatum

Park. model



Homogénéité du champ magnétique

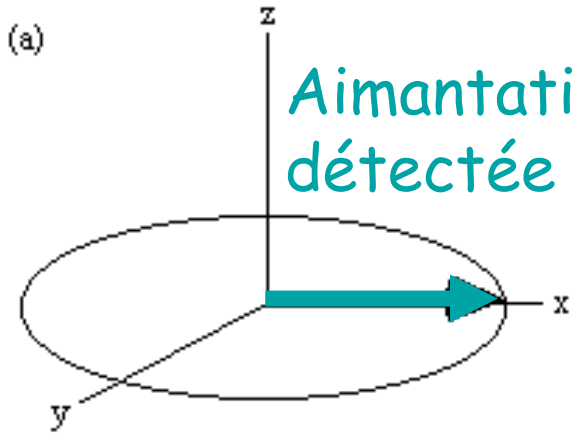
- Différence de précession de l'ordre de quelques Hz (vs fréquence de base en centaines de MHz)

- 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



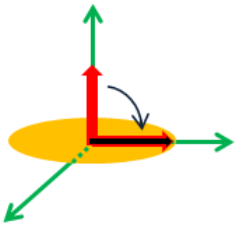
Aimantation détectée

Aimantation détectée

Echo de spin

- Un des schémas de base de l'IRM!!

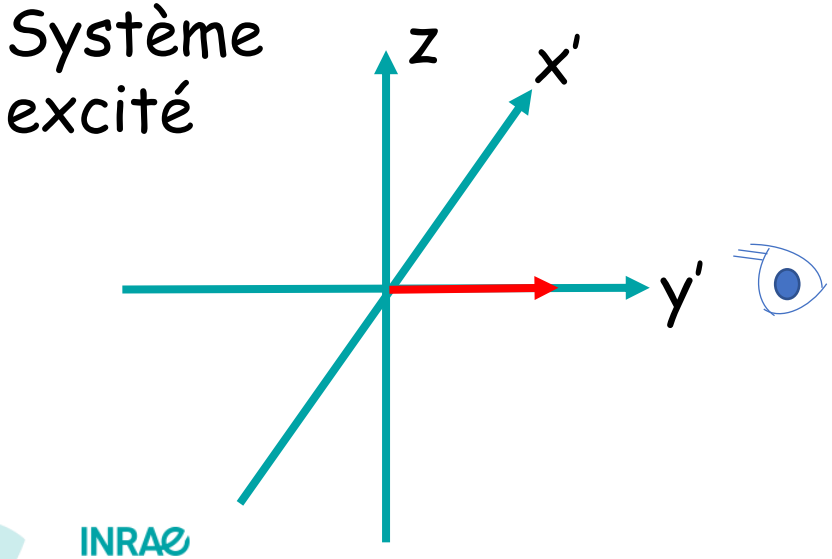
Excitation RF

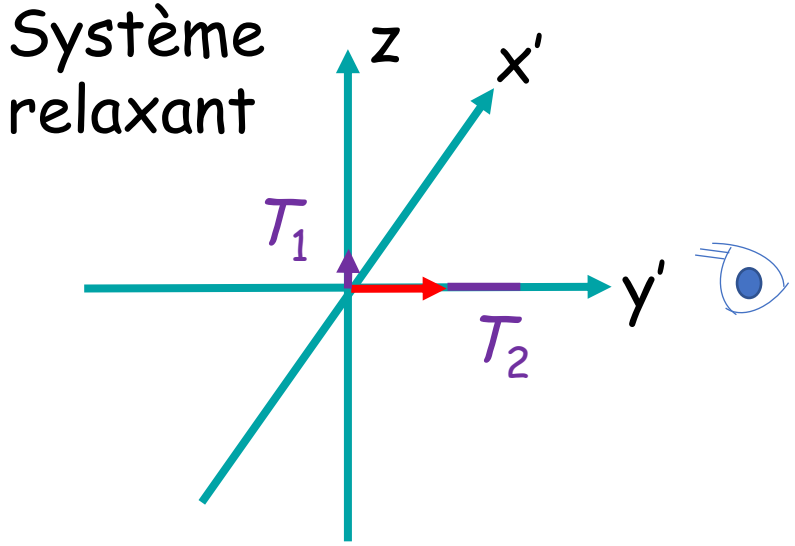


Les relaxations

- Relaxation longitudinale T_1: retour à l'état d'équilibre de l'aimantation

- Relaxation transversale T_2: perte d'aimantation dans le plan transversal





Mécanismes de relaxation

- Relaxation dipolaire
  - Orientation des spins ne change pas par rapport à $\mathbf{B}_0$
  - 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)

- $^{1}H_2O$
  - γ et abondance naturelle du ^{1}H très élevés (sensibilité)
  - 2 protons par molécule d'eau

Observation des molécules d'eau

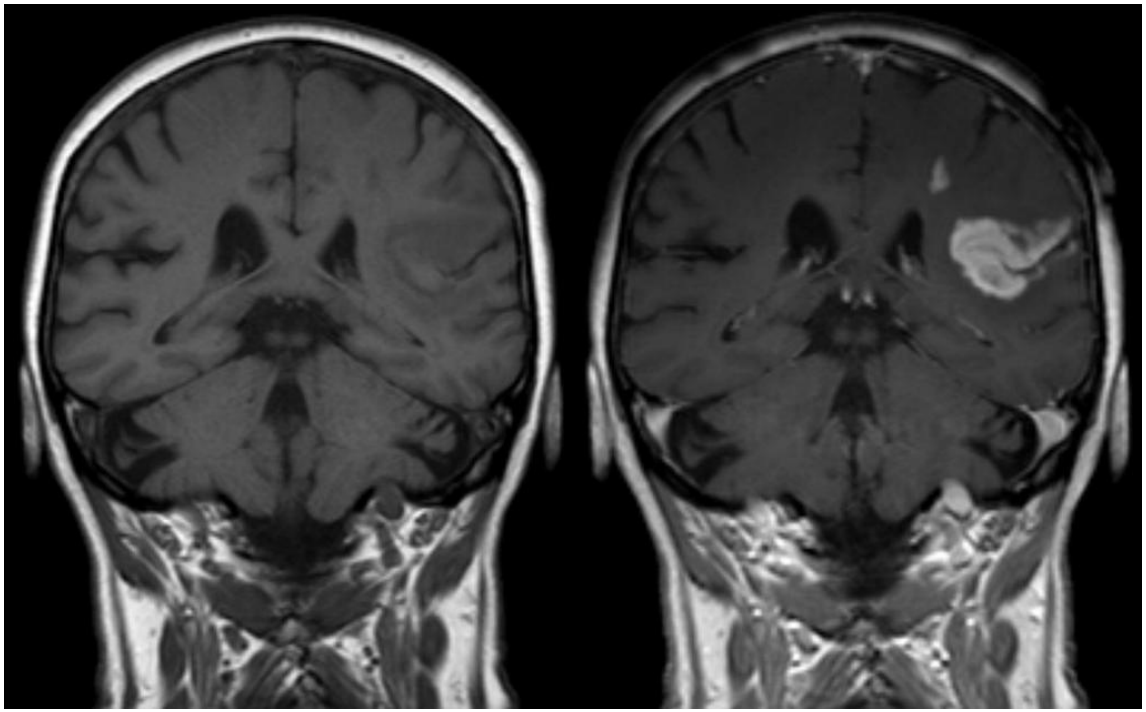
Le contraste en IRM

- 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

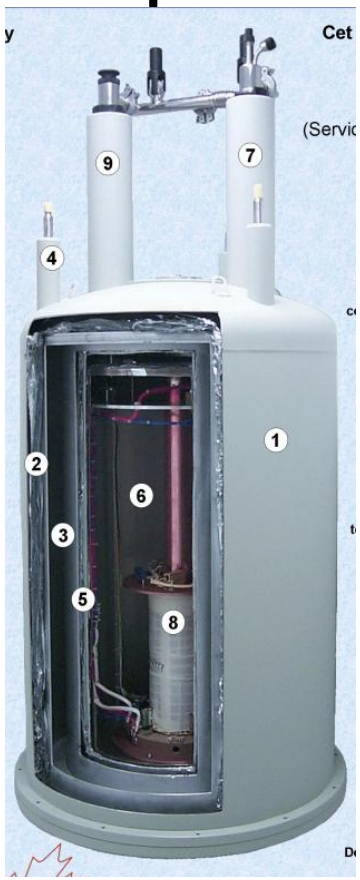


https://www.wikiwand.com/en/MRI_contrast_agent

Introduction à l'équipement RMN

Création de l'aimantation

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





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



