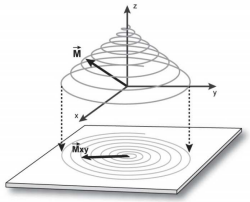
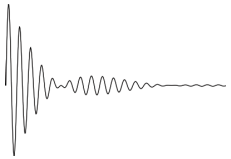
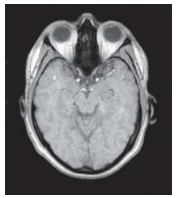
Magnétisme RMN

Formation de l'image IRM
Séquences d'acquisition







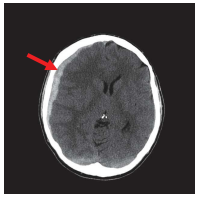
Catherine Lozza - Fayçal Ben Bouallègue
UM – CHU Montpellier
catherine.lozza@umontpellier.fr

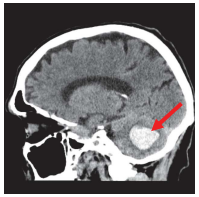
http://scinti.edu.umontpellier.fr/enseignements/cours/

Contexte

Explorations morphologiques en coupe

Scanner (TDM, tomodensitométrie)



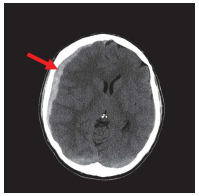


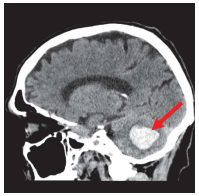
Carte de densité des tissus traversés par RX.
Comparaison signal émis / signal reçu

Contexte

Explorations morphologiques en coupe

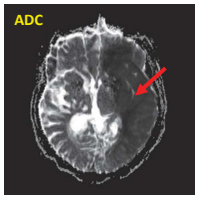
Scanner (TDM, tomodensitométrie)





Résonance magnétique (IRM)

dt

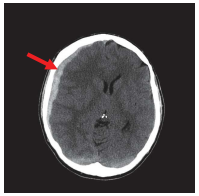


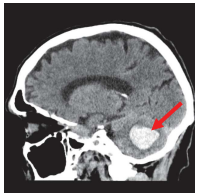
gche

Contexte

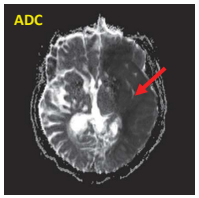
Explorations morphologiques en coupe

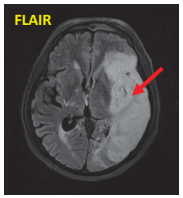
Scanner (TDM, tomodensitométrie)





Résonance magnétique (IRM)

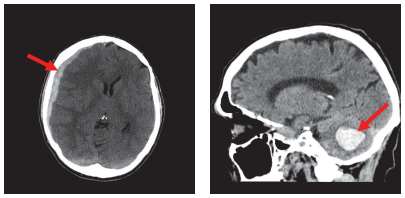




Contexte

Explorations morphologiques en coupe

Scanner (TDM, tomodensitométrie)

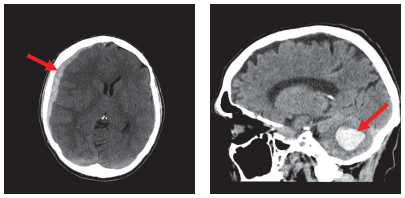


Résonance magnétique (IRM)

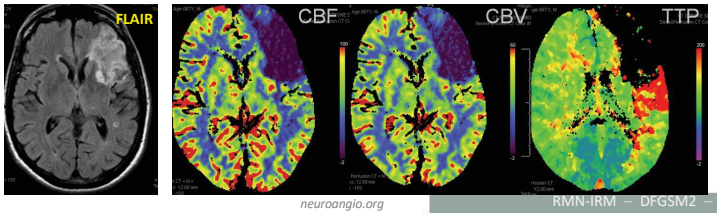
Contexte

Explorations morphologiques en coupe

Scanner (TDM, tomodensitométrie)



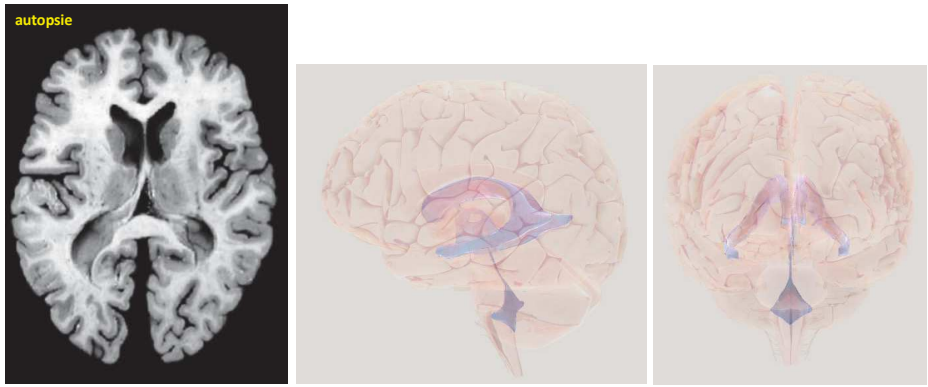
Résonance magnétique (IRM)



neuroangio.org

Contexte

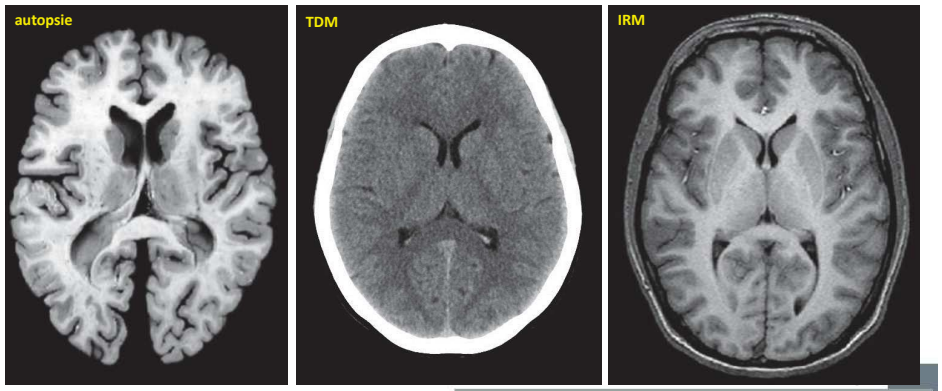
Explorations morphologiques en coupe



Contexte

Explorations morphologiques en coupe

IRM : excellent contraste des tissus mous



Objectifs pédagogiques

- Propriétés magnétiques du protons: spin, moment magnétique, énergie magnétique.
- Phénomène de Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) dans un champ magnétique externe : précession, fréquence de Larmor, alignement.
- Principe d'une expérience de RMN : préparation (aimantation), perturbation (résonance), recueil du signal, bases physiques des phénomènes de relaxation (T_1 et T_2).
- Séquence d'acquisition RMN et différents paramètres ajustables (temps de répétition, temps d'écho, angle de bascule): influence sur le contraste dans l'image par Résonance Magnétique (IRM).
- Dispositifs d'IRM: IRM des flux, IRM fonctionnelle, Spectrométrie RMN *in vivo*
- Risques de l'IRM

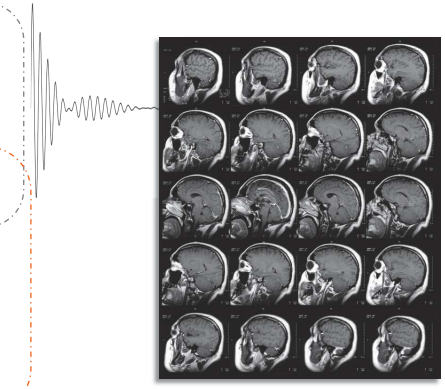
Biophysique; A. Aurengo et T. Petitclerc; Biophysique pour les sciences de la vie et de la santé; X. Marchandise. Proposition du CNEBMN

Plan du cours

Partie I

- Champ et interactions
- Modèle de l'électron
- Mécanique quantique
- Magnétisme nucléaire
- RMN – principe, séquence, contraste
- Formation de l'image
- Séquences d'acquisition
- Dispositifs d'IRM
- Risques de l'IRM

Partie II



Rappels & conventions

Grandeurs scalaires :

x, y, z, t
m, q, e
$V(x, y, z)$
$\hbar = h/2\pi$

Rappels & conventions

Grandeurs scalaires :

x, y, z, t
m, q, e
$V(x, y, z)$
$\hbar = h/2\pi$

Grandeurs vectorielles :

$\mathbf{x} = (x, y, z)$
$\mathbf{F}, \mathbf{\Gamma}$
$\mathbf{B}(\mathbf{x})$
$\mathbf{L} = (L_x, L_y, L_z)$
$\omega = |\boldsymbol{\omega}|$

Rappels & conventions

Grandeurs scalaires :

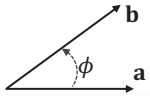
x, y, z, t
m, q, e
$V(x, y, z)$
$\hbar = h/2\pi$

Grandeurs vectorielles :

$\mathbf{x} = (x, y, z)$
$\mathbf{F}, \mathbf{\Gamma}$
$\mathbf{B}(\mathbf{x})$
$\mathbf{L} = (L_x, L_y, L_z)$
$\omega = |\boldsymbol{\omega}|$

Produit scalaire :

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z$$
$$= a\, b \cos(\phi)$$



Rappels & conventions

Grandeurs scalaires :

x, y, z, t
m, q, e
$V(x, y, z)$
$\hbar = h/2\pi$

Grandeurs vectorielles :

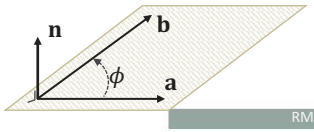
$\mathbf{x} = (x, y, z)$
$\mathbf{F}, \mathbf{\Gamma}$
$\mathbf{B}(\mathbf{x})$
$\mathbf{L} = (L_x, L_y, L_z)$
$\omega = |\boldsymbol{\omega}|$

Produit scalaire :

$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = a\, b \cos(\phi)$

Produit vectoriel :

$\mathbf{a} \wedge \mathbf{b} = a\, b \sin(\phi)\, \mathbf{n}$



Plan du cours

Champ et interactions

Modèle de l'électron

Mécanique quantique

Magnétisme nucléaire

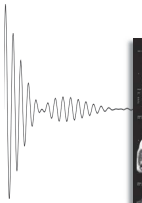
RMN – principe, séqeunce, contraste

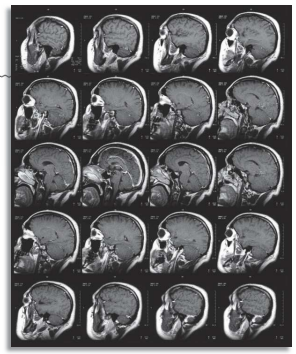
Formation de l'image

Séquences d'acquisition

Dispositifs d'IRM

Risques de l'IRM





Champ et interaction électrique

ONDES SON OEM PROPAGATION(VISION) DUALITE ATOME X RA

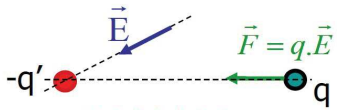
RAPPELS ELECTRO ET MAGNETOSTATIQUE

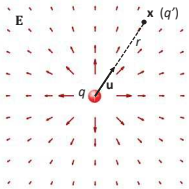
Champs statiques (créés par des distributions de charges ou de courants électriques constants dans le temps). Exemples :

- Charge ponctuelle permanente $\Rightarrow \vec{E}$

$$\left\|\vec{E}(r)\right\| = \frac{q'}{4\pi\varepsilon}\frac{1}{r^2}$$

Permittivité: $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 = \varepsilon_r .8{,}85.10^{-12} F.m^{-1}$





Cours PASS 2020-2021 UE7-Biophysique Pr D. MARIANO-GOULART

RAPPELS ELECTRO ET MAGNETOSTATIQUE

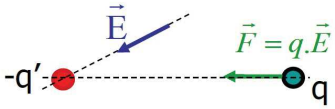
Champs statiques (créés par des distributions de charges ou de courants électriques constants dans le temps). Exemples :

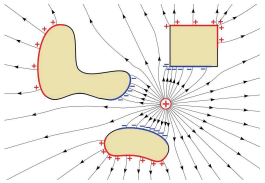
- Charge ponctuelle permanente $\Rightarrow \vec{E}$

$$\left\|\vec{E}(r)\right\| = \frac{q'}{4\pi\varepsilon}\frac{1}{r^2}$$

Permittivité: $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 = \varepsilon_r .8{,}85.10^{-12} F.m^{-1}$

Dans un matériau: $\varepsilon > \varepsilon_0$





RAPPELS ELECTRO ET MAGNETOSTATIQUE

Champs statiques (créés par des distributions de charges ou de courants électriques constants dans le temps). Exemples :

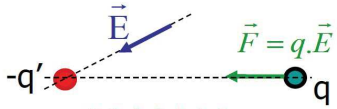
- Charge ponctuelle permanente $\Rightarrow \vec{E}$

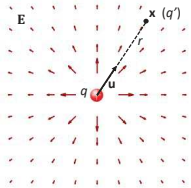
$$\left\|\vec{E}(r)\right\| = \frac{q'}{4\pi\varepsilon}\frac{1}{r^2}$$

Permittivité: $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 = \varepsilon_r .8{,}85.10^{-12} F.m^{-1}$

Source = charge q statique (monopôle électrique)

Champ : $\mathbf{E}(\mathbf{x}) = \frac{q}{4\pi\varepsilon\, r^2}\mathbf{u}$ [Vm^{-1}]

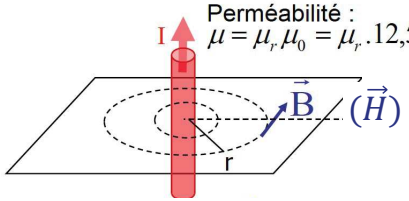




RAPPELS ELECTRO ET MAGNETOSTATIQUE

- Circuit de courant permanent $\Rightarrow \vec{B}$

Perméabilité :
$\mu = \mu_r \mu_0 = \mu_r .12{,}57.10^{-7} H m^{-1}$ [N.A^{-2}]
= Henry [V.s.A^{-1}]



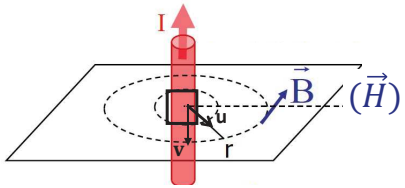
PASS

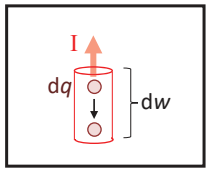
Champ (d'induction) magnétique: $\mathbf{B}(\mathbf{x}) = \mu\, \mathbf{H}(\mathbf{x})$ [Am^{-1}]

[T Tesla *ou* N.A^{-1}.m^{-1}]

RAPPELS ELECTRO ET MAGNETOSTATIQUE

- Circuit de courant permanent $\Rightarrow \vec{B}$



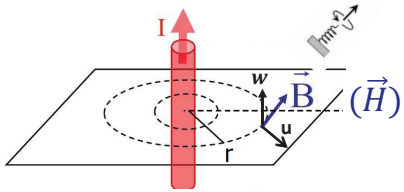


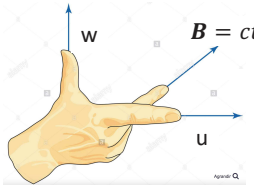
Source : courant passant dans un fil électrique droit : $i = dq/dt$

Vitesse : $\mathbf{v} = dw/dt$

RAPPELS ELECTRO ET MAGNETOSTATIQUE

- Circuit de courant permanent $\Rightarrow \vec{B}$





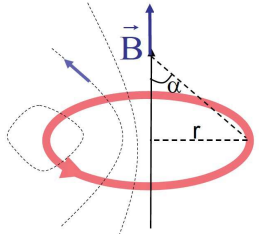
Source : courant passant dans un fil électrique droit : $i = dq/dt$
Vitesse : $\mathbf{v} = d\mathbf{w}/dt$

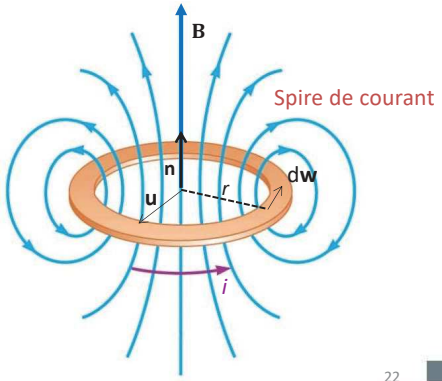
Champ magnétique : $\mathbf{H}(\mathbf{x}) = \frac{i}{2\pi\, r}\, \mathbf{w} \wedge \mathbf{u}$ [Am^{-1}] *(comprend l'intégrale sur le fil des contributions en terme de champ magnétique à ce point là)*

Champ (d'induction) magnétique: $\mathbf{B}(\mathbf{x}) = \mu\, \mathbf{H}(\mathbf{x}) = \frac{\mu\, i}{2\pi\, r}\, \mathbf{w} \wedge \mathbf{u}$ [T Tesla]

RAPPELS ELECTRO ET MAGNETOSTATIQUE

- Circuit de courant permanent $\Rightarrow \vec{B}$



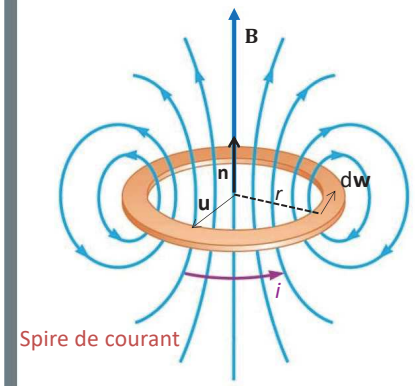


Source : courant passant dans une boucle fermée: courant i

Champ : en tout point de la spire, les lignes de champ sont circulaires autour de la spire

Source : courant passant dans une boucle fermée: courant i

Champ : chaque élément d'une boucle de courant d**w** produit le champ magnétique élémentaire d**B**

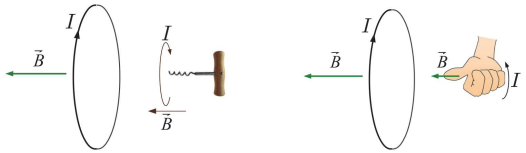


$$d\mathbf{B} = cte\; d\mathbf{w} \wedge \mathbf{u}$$

$$d\mathbf{B} \perp d\mathbf{w}$$

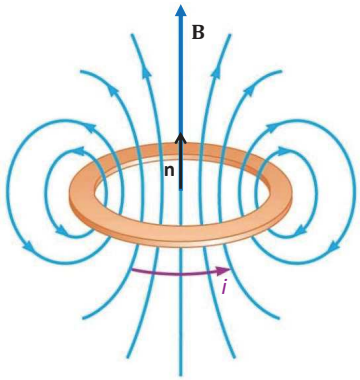
$$d\mathbf{B} \perp \mathbf{u}$$

$$\mathbf{B} = \int_{spire} cte\; d\mathbf{w} \wedge \mathbf{u} = \frac{\mu i}{2\, r}\, \mathbf{n}$$



Source : boucle de courant i

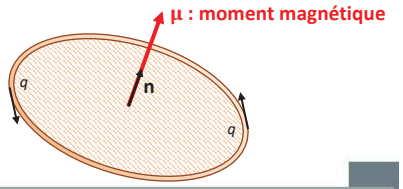
Champ : $\mathbf{B} = \frac{\mu\, i}{2r}\, \mathbf{n}$



Cible : particules élémentaires en mouvement

→ Nucléons d'un noyau animés d'un mouvement collectif complexe comportant une rotation individuelle autour d'un axe passant par leurs propres centres

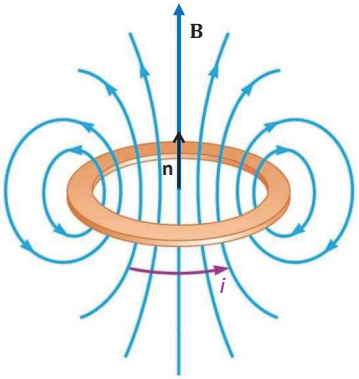
→ Electron atomique animés d'un mouvement de rotation sur son orbitale autour du noyau



Champ et interaction magnétique

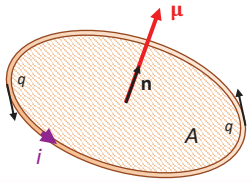
Source : boucle de courant *i*

Champ : $\mathbf{B} = \frac{\mu\, i}{2r}\mathbf{n}$



Cible : dipôle magnétique

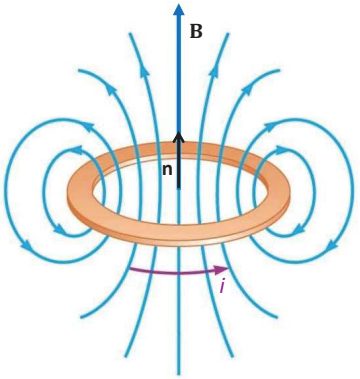
Moment magnétique : $\boldsymbol{\mu} = A\, i\, \mathbf{n}$ [Am²]



Champ et interaction magnétique

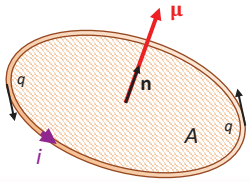
Source : boucle de courant *i*

Champ : $\mathbf{B} = \frac{\mu\, i}{2r}\mathbf{n}$



Cible : dipôle magnétique

Moment magnétique : $\boldsymbol{\mu} = A\, i\, \mathbf{n}$ [Am²]

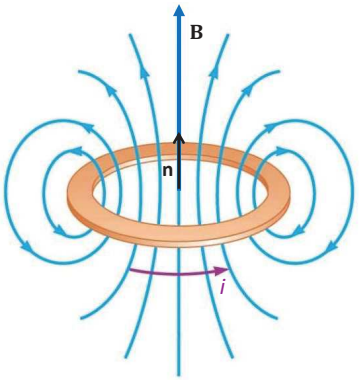


RMN-IRM – DFGSM2 – 2021-2022

Champ et interaction magnétique

Source : boucle de courant *i*

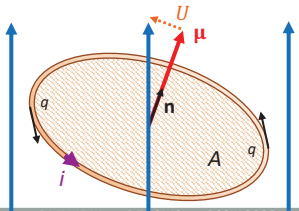
Champ : $\mathbf{B} = \frac{\mu\, i}{2r}\mathbf{n}$



Cible : dipôle magnétique

Moment magnétique : $\boldsymbol{\mu} = A\, i\, \mathbf{n}$ [Am²]

Energie : $U = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}$ [J]

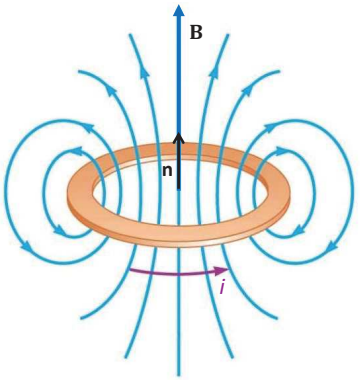


RMN-IRM – DFGSM2 – 2021-2022

Champ et interaction magnétique

Source : boucle de courant *i*

Champ : $\mathbf{B} = \frac{\mu\, i}{2r}\mathbf{n}$

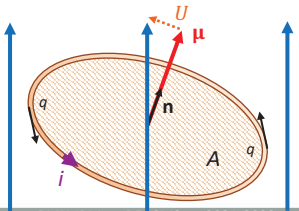


Cible : dipôle magnétique

Moment magnétique : $\boldsymbol{\mu} = A\, i\, \mathbf{n}$ [Am²]

Energie : $U = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}$ [J]

$U = 0$ si $\boldsymbol{\mu} \perp \mathbf{B}$
$U < 0$ si $\boldsymbol{\mu}$ aligné sur $\mathbf{B}$
$U > 0$ si $\boldsymbol{\mu}$ opposé sur $\mathbf{B}$

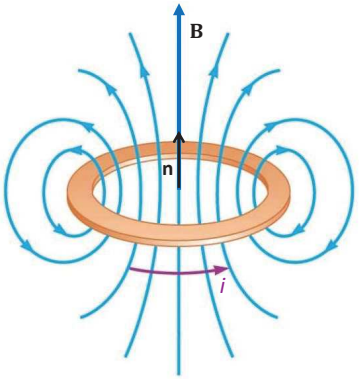


RMN-IRM – DFGSM2 – 2021-2022

Champ et interaction magnétique

Source : boucle de courant *i*

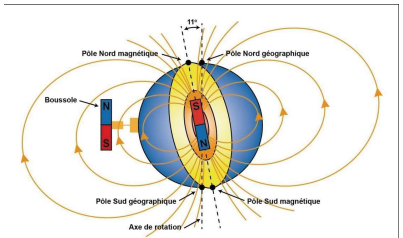
Champ : $\mathbf{B} = \frac{\mu\, i}{2r}\mathbf{n}$



Cible : dipôle magnétique

Moment magnétique : $\boldsymbol{\mu}$ [Am²]

Energie : U [J]



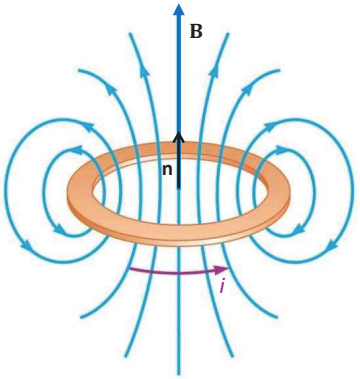
Le champ magnétique terrestre

https://gq.mines.gouv.qc.ca/geologie-pour-tous/geomagnetisme/

Champ et interaction magnétique

Source : boucle de courant *i*

Champ : $\mathbf{B} = \frac{\mu\, i}{2r}\mathbf{n}$



Cible : dipôle magnétique

A-a- LA STRUCTURE DE L'ATOME.

4) Le nombre quantique de spin, s

- L'électron assimilé à un petit aimant prend 2 orientations dans un champ magnétique
- Peut prendre 2 valeurs : $+\frac{1}{2}$ et $-\frac{1}{2}$

L'électron est représenté par une flèche : $+\frac{1}{2} = \uparrow$ et $-\frac{1}{2} = \downarrow$

Dans chaque orbitale (ou case) (décrite par un triplet (n,l,m)) on peut placer au maximum 2 électrons (de spin opposé)

Cours PASS 2020-2021 UE1-ECUE1.1-Chimie Dr D. DURAND

DFGSM2 2021-2022
UE Biophysique et bases de l'imagerie

Plan du cours

Champ et interactions

Modèle de l'électron

Mécanique quantique

Magnétisme nucléaire

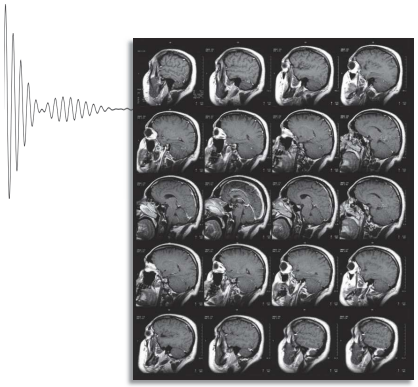
RMN – principe, séqeunce, contraste

Formation de l'image

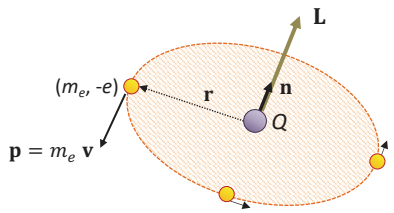
Séquences d'acquisition

Dispositifs d'IRM

Risques de l'IRM



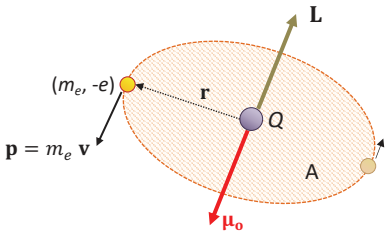
Modèle de l'électron atomique



Moment cinétique : orbital $\mathbf{L} = \mathbf{r} \wedge \mathbf{p} = r\, m_e v\, \mathbf{n}$ → *angular momentum*

Quantité de mouvement: $\mathbf{p} = m_e\mathbf{v}$ → *linear momentum*

Modèle de l'électron atomique



$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{-e}{T} = \frac{-e}{2\pi r/v} = \frac{-e\,v}{2\pi r}$$

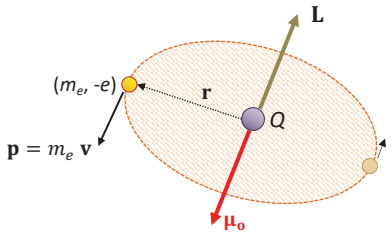
Moment cinétique : orbital $\mathbf{L} = \mathbf{r} \wedge \mathbf{p} = r\,m_e v\,\mathbf{n}$

Moment magnétique : orbital $\boldsymbol{\mu}_o = A\,i\,\mathbf{n} = -\pi r^2\,\frac{e\,v}{2\pi r}\,\mathbf{n} = -\frac{r\,e\,v}{2}\,\mathbf{n}$

$$\frac{\boldsymbol{\mu}_o}{\boldsymbol{L}} = -\frac{e}{2\,m_e}$$

$\boldsymbol{\mu}_o$ et **L** sont de sens opposé

Modèle de l'électron atomique



Moment cinétique : orbital $\mathbf{L} = r\,m_e v\,\mathbf{n}$

Moment magnétique : orbital $\boldsymbol{\mu}_o = -\frac{r\,e\,v}{2}\,\mathbf{n}$

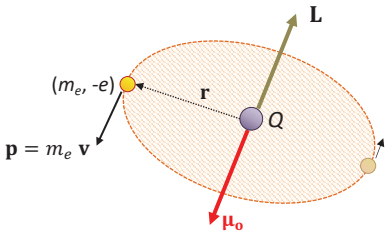
$$\boldsymbol{\mu}_o = -\frac{e}{2\,m_e}\,\mathbf{L} = \gamma_o\,\mathbf{L}$$

$\gamma_o = -\frac{e}{2\,m_e}$ **Rapport gyromagnétique orbital** [C kg^{-1}] *ou* [rad s^{-1} T^{-1}]

$\bar{\gamma}_o = \frac{\gamma}{2\pi}$

$\bar{\gamma}_o = 14GHz.T^{-1}$

Modèle de l'électron atomique



Moment cinétique : orbital $\mathbf{L} = r\,m_e v\,\mathbf{n}$

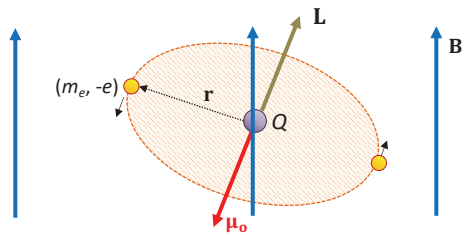
Moment magnétique : orbital $\boldsymbol{\mu}_o = -\frac{e}{2\,m_e}\,\mathbf{L} = \gamma_o\,\mathbf{L}$

$\gamma_o = -\frac{e}{2\,m_e}$ **Rapport gyromagnétique orbital** [C kg^{-1}] *ou* [Hz T^{-1}]

Magnéton de Bohr électronique:

$\hbar = \frac{h}{2\pi}$ $\gamma_o\hbar = \frac{e}{2\,m_e}\hbar$ $\mu_B = \frac{e\hbar}{2\,m_e}$ [JT^{-1}] *ou* [Am^2]

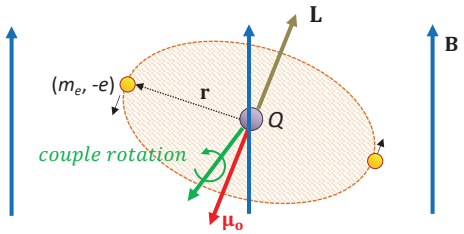
Modèle de l'électron atomique



Dans le champ électrostatique du noyau + champ magnétique externe

Energie : $U = U_{potentielle\ électrique} - \boldsymbol{\mu}_o \cdot \mathbf{B}$

Modèle de l'électron atomique

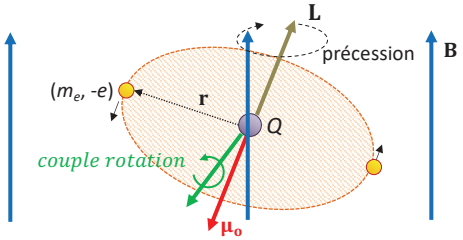


Dans le champ électrostatique du noyau + champ magnétique externe

Energie : $U = U_{potentielle\ électrique} - \boldsymbol{\mu}_o \cdot \mathbf{B}$

Evolution : $\frac{d\mathbf{L}}{dt} = \boldsymbol{couple\ de\ rotation} = \boldsymbol{\mu}_o \wedge \mathbf{B} = \gamma_o\, \mathbf{L} \wedge \mathbf{B}$

Modèle de l'électron atomique



Absence de champ magnétique externe B :

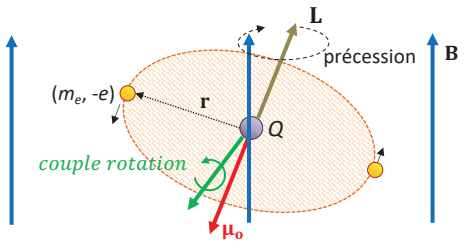
$$\frac{d\mathbf{L}}{dt} = \boldsymbol{couple\ de\ rotation\ nul} \Rightarrow \quad \mathbf{L} = \mathbf{cste}$$

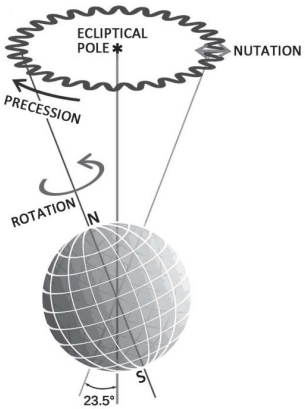
Présence de champ magnétique externe B (intense):

$$\frac{d\mathbf{L}}{dt} = \boldsymbol{\mu}_o \wedge \mathbf{B} = \gamma_o\, \mathbf{L} \wedge \mathbf{B}$$

→ Précession autour de l'axe de **B**

Modèle de l'électron atomique





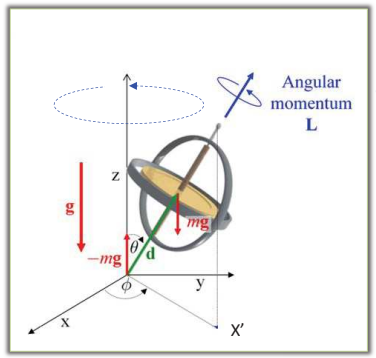
Présence de champ magnétique externe B :

$$\frac{d\mathbf{L}}{dt} = \boldsymbol{\mu}_o \wedge \mathbf{B} = \gamma_o\, \mathbf{L} \wedge \mathbf{B}$$

→ Précession autour de l'axe de **B**

Modèle de l'électron atomique

Analogie de la toupie



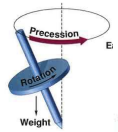
→moment cinétique

Axe de la toupie

Champ gravitationnel

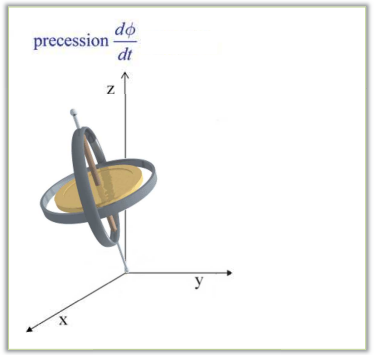
Mouvement de rotation imprimé par l'utilisateur

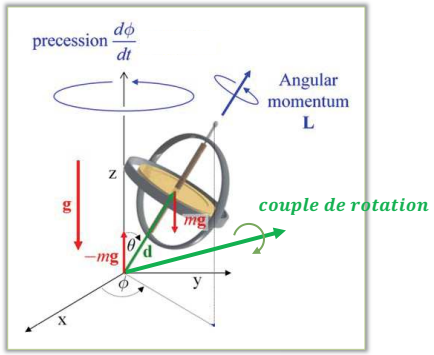
Mouvement de précession autour du champ de gravitation



Modèle de l'électron atomique

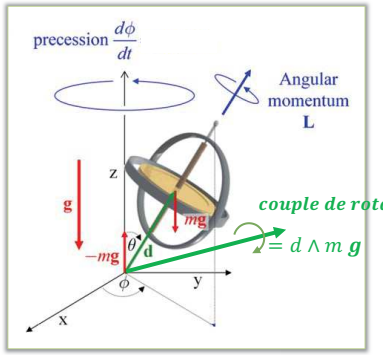
Analogie de la toupie

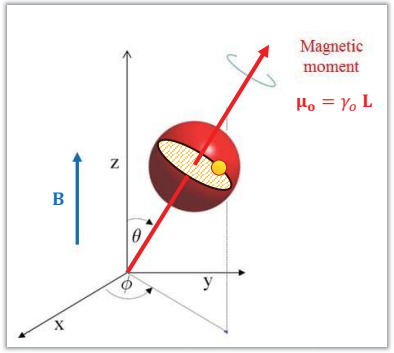




Modèle de l'électron atomique

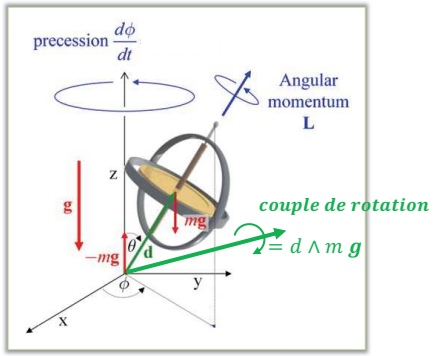
Analogie de la toupie

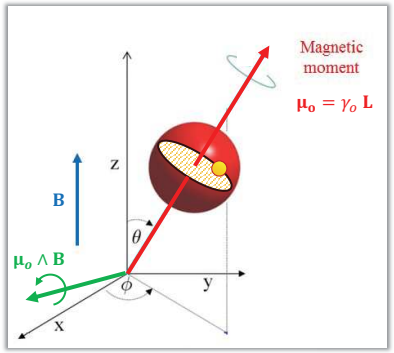




Modèle de l'électron atomique

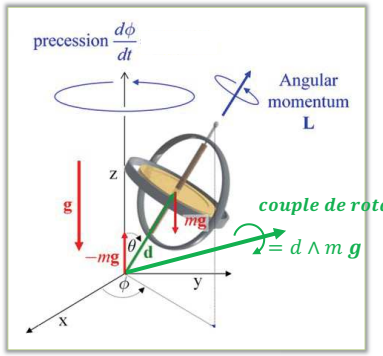
Analogie de la toupie

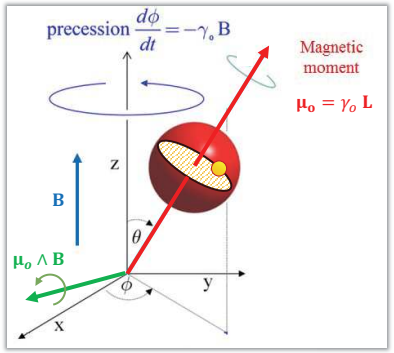




Modèle de l'électron atomique

Analogie de la toupie

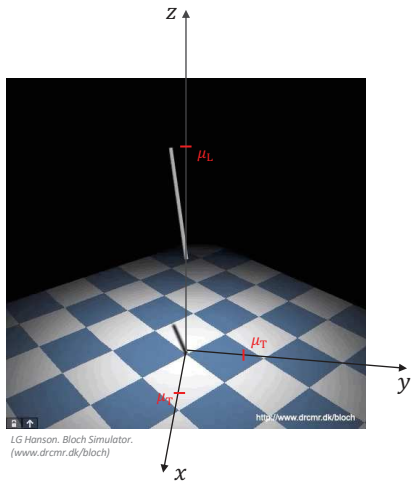




Mouvement de **précession** $\boxed{\frac{d\phi}{dt} = -\gamma_o\, \mathbf{B}}$

[rad.s^{-1}]

Modèle de l'électron atomique



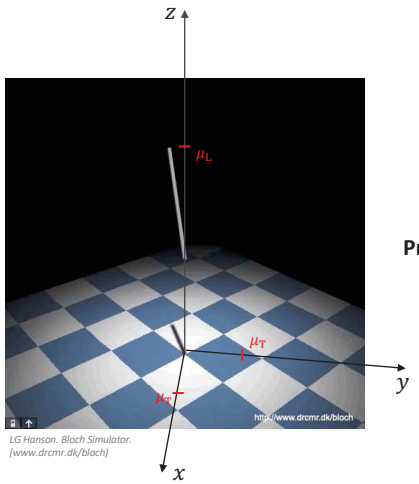
LG Hanson. Bloch Simulator. (www.drcmr.dk/bloch)

Composante verticale μ_L *(longitudinale)* toujours identique, projetée sur l'axe (Oz)

Composante horizontale μ_T *(transverse)* décrit un cercle dans le plan horizontal (xOy)

Mouvement de **précession** de vitesse angulaire: $\boxed{\dfrac{d\phi}{dt} = -\gamma_o \mathbf{B}}$ [rad.s^{-1}]

Modèle de l'électron atomique



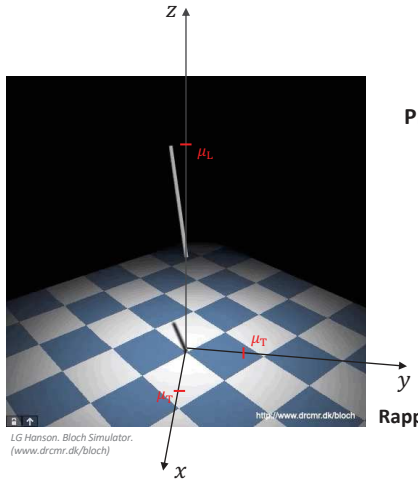
LG Hanson. Bloch Simulator. (www.drcmr.dk/bloch)

Précession de Larmor : $\boxed{\boldsymbol{\omega} = -\gamma_o \mathbf{B}}$ [rad.s^{-1}]

$\boxed{\boldsymbol{\nu} = -\bar{\gamma}_o \mathbf{B}}$ [Hz]

$\boxed{\bar{\gamma} = \dfrac{\gamma}{2\pi}}$ [Hz T^{-1}]

Modèle de l'électron atomique



LG Hanson. Bloch Simulator. (www.drcmr.dk/bloch)

Précession de Larmor : $\boxed{\boldsymbol{\omega} = -\gamma_o \mathbf{B}}$ [rad.s^{-1}]

$\boxed{\boldsymbol{\nu} = -\bar{\gamma}_o \mathbf{B}}$ [Hz]

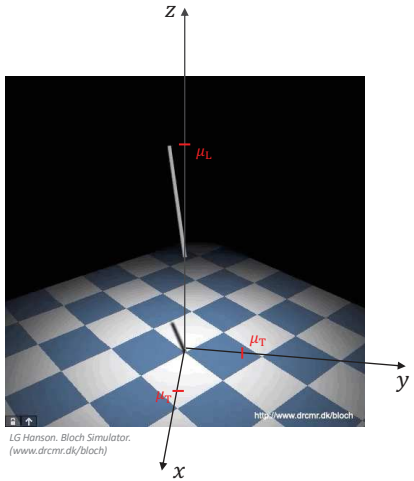
$\boxed{\bar{\gamma} = \dfrac{\gamma}{2\pi}}$ [Hz T^{-1}]

Rapport gyromagnétique $\boxed{\gamma_o = -\dfrac{e}{2\,m_e}}$ [C kg^{-1}] ou [rad Hz T^{-1}]

$\bar{\gamma}_o \simeq 14\ \mathrm{GHz\ T^{-1}}$

Dans un champ de **1 T** : $\nu = 14\ \mathrm{GHz}$ (micro-onde)

Modèle de l'électron atomique



LG Hanson. Bloch Simulator. (www.drcmr.dk/bloch)

Précession (relation) de Larmor :

$\boxed{\boldsymbol{\omega} = -\gamma_o \mathbf{B}}$

(et la relation qui en découle):

$\boxed{\boldsymbol{\nu} = -\bar{\gamma}_o \mathbf{B}}$

Le mouvement de précession se fait à

Une fréquence donnée

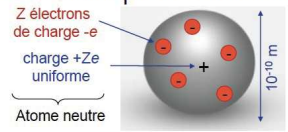
Et dépend
- *de l'intensité du champ*
- *du rapport gyromagnétique (qui dépend de la particule considérée)*

Modèle de l'électron atomique

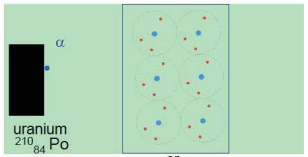
ONDES SON OEM PROPAGATION(VISION) DUALITE ATOME X RA

MODELES ATOMIQUES

- Modèle atomique de Thomson



- Modèle atomique d'E. Rutherford (1911)



PASS Anim

Modèle de l'électron atomique

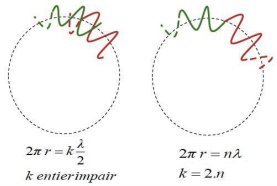
ONDES SON OEM PROPAGATION(VISION) DUALITE ATOME X RA

MODELE ATOMIQUE DE BOHR

- Dualité onde-électron ⇒ quantification

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

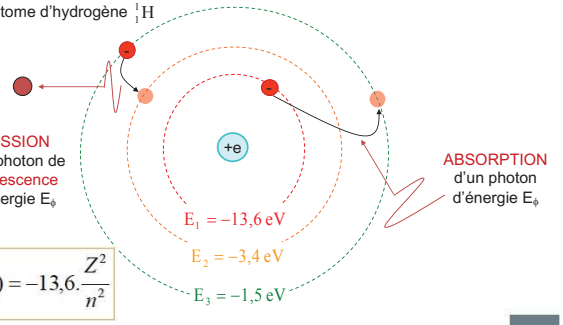
- Quantification : $2\pi r = n\lambda$



D'où la quantification du M^t cinétique de l'e$^-$:

$$\|\vec{L}\| = \|\vec{p} \wedge \vec{r}\| = mvr = n\hbar \text{ avec } n = 1,2,...$$

Pour l'atome d'hydrogène ^1_1H



$$E_n(eV) = -13,6.\frac{Z^2}{n^2}$$

PASS

Modèle de l'électron atomique

ONDES SON OEM PROPAGATION(VISION) DUALITE ATOME X RA

RELATION DE LOUIS DE BROGLIE

$$p = \hbar.k \Rightarrow p = \hbar.\frac{\omega}{c_n} = \hbar.\frac{2\pi}{\lambda} = \frac{h}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Constante de Planck
$h = 6,62\ 10^{-34}$ J.s
$\hbar = h/2\pi$

Longueur d'onde (m) ↔ quantité de mouvement de la particule (kg.m.s^{-1})

ONDE ↔ PARTICULE

1892-1987

PASS

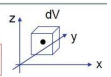
Vérifié pour les particules élémentaires

ONDES SON OEM PROPAGATION(VISION) DUALITE ATOME X RA

FONCTION D'ONDE ET EQUATION DE SCHRODINGER

- Interprétation de Copenhague (M. Born, 1926) :

La fonction d'onde ψ d'une particule détermine sa probabilité de présence en un lieu dV à l'instant t : $p = |\psi(x, y, z, t)|^2 dV$



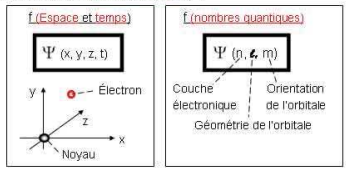
Modèle de l'électron atomique

L'électron est décrit par une onde : $\Psi(\mathbf{x}, t) : \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{C}$

La description complète de la fonction d'onde de l'électron atomique fait apparaître 3 nombres quantiques

Le 4ème nombre, « s » nous intéressera plus tard

Expressions de la fonction d'onde psi Ψ



A-a- LA STRUCTURE DE L'ATOME.

Description ELECTRONIQUE DE L'ATOME

Erwin Schrödinger (1887-1961)

Un électron est défini par :
- ✓ un niveau énergétique (théorie des quanta)
- ✓ un mouvement autour du noyau

Equation de Schrödinger

4 Nombres Quantiques

n	ℓ	m	s
Principal	Secondaire	Magnétique orbital	spin

Energie. Eloignement de l'électron par rapport au noyau

Niveaux d'énergie

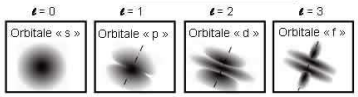
Ψ(n, ℓ, m, s)

Répartition électronique

n : Principal
ℓ : Secondaire (ou azimutal)
m : Magnétique (ou tertiaire)

Orbitale atomique
Zone de forte probabilité de présence de l'électron

Formes des orbitales. nombre quantique secondaire ℓ



PASS

Plan du cours

Champ et interactions

Modèle de l'électron

Mécanique quantique

Magnétisme nucléaire

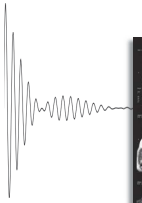
RMN – principe, séquence, contraste

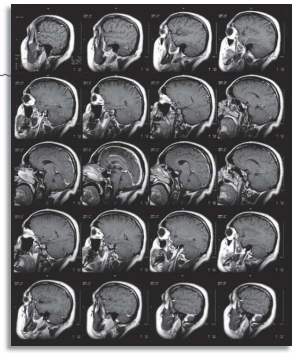
Formation de l'image

Séquences d'acquisition

Dispositifs d'IRM

Risques de l'IRM





Mécanique quantique

Pourquoi?

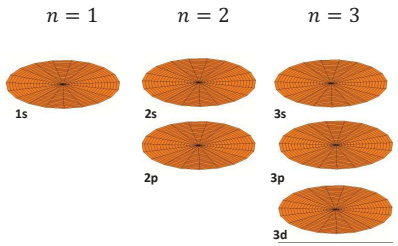
Les particules très petites ne suivent pas les règles de la **mécanique classique** mais obéissent aux postulats de la **mécanique quantique**

Mécanique quantique

L'électron est décrit par une onde : $\Psi(\mathbf{x}, t) : \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{C}$

La description complète de la fonction d'onde de l'électron atomique fait apparaître 3 nombres quantiques

n : quantification de l'énergie E



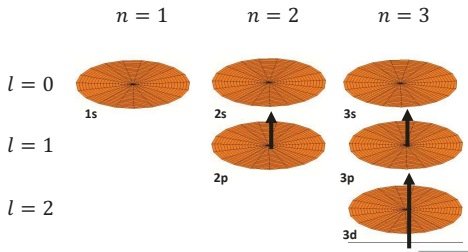
Mécanique quantique

L'électron est décrit par une onde : $\Psi(\mathbf{x}, t) : \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{C}$

La description complète de la fonction d'onde de l'électron atomique fait apparaître 3 nombres quantiques

n : quantification de l'énergie E

l : quantification du moment cinétique $|\mathbf{L}| = \hbar\sqrt{l(l+1)}$ (l entier)



Mécanique quantique

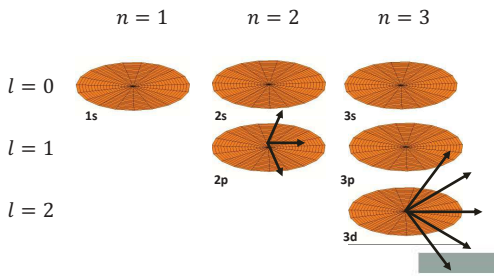
L'électron est décrit par une onde : $\Psi(\mathbf{x}, t) : \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{C}$

La description complète de la fonction d'onde de l'électron atomique fait apparaître 3 nombres quantiques

n : quantification de l'énergie E

l : quantification du moment cinétique $|\mathbf{L}| = \hbar\sqrt{l(l+1)}$

m : quantification de $L_z = m\hbar = -l\hbar \ \dots \ 0 \ \dots \ l\hbar$



Mécanique quantique

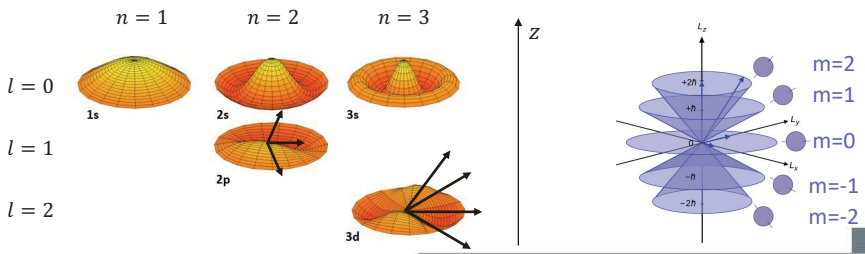
L'électron est décrit par une onde : $\Psi(\mathbf{x}, t) : \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{C}$

La description complète de la fonction d'onde de l'électron atomique fait apparaître 3 nombres quantiques

n : quantification de l'énergie E

l : quantification du moment cinétique $|\mathbf{L}| = \hbar\sqrt{l(l+1)}$

m : quantification de $L_z = m\hbar = -l\hbar \ \dots \ 0 \ \dots \ l\hbar$



Mécanique quantique

L'électron est décrit par une onde : $\Psi(\mathbf{x}, t) : \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{C}$

La description complète de la fonction d'onde de l'électron atomique fait apparaître 3 nombres quantiques

n : quantification de l'énergie E

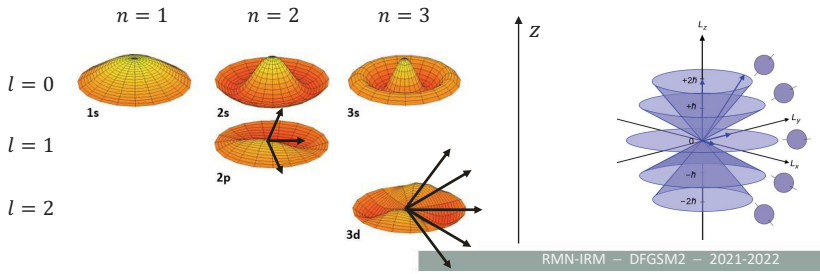
l : quantification du moment cinétique $|\mathbf{L}| = \hbar\sqrt{l(l+1)}$

m : quantification de $L_z = m\hbar = -l\hbar \ \dots \ 0 \ \dots \ l\hbar$

n entier positif > 0

$0 \leq l \leq n-1$

$-l \leq m \leq +l$



Mécanique quantique

L'électron est décrit par une onde : $\Psi(\mathbf{x}, t) : \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{C}$

La description complète de la fonction d'onde de l'électron atomique fait apparaître 3 nombres quantiques

n : quantification de l'énergie E

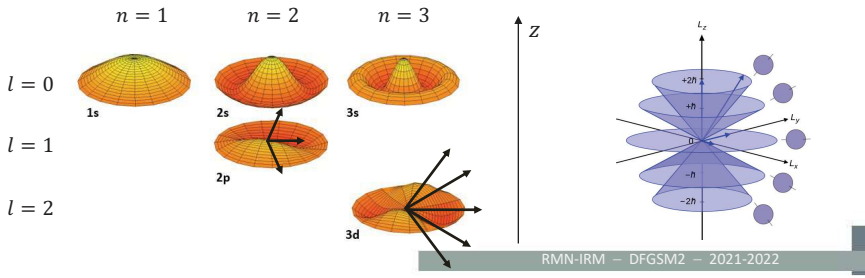
l : quantification du moment cinétique $|\mathbf{L}| = \hbar\sqrt{l(l+1)}$

m : quantification de $L_z = m\hbar = -l\hbar \ \dots \ 0 \ \dots \ l\hbar$

$$\boldsymbol{\mu}_\mathbf{o} = \gamma_o \, \mathbf{L}$$

$$|\boldsymbol{\mu}_\mathbf{o}| = \gamma_o \hbar\sqrt{l(l+1)}$$

$$\mu_{oz} = \gamma_o \, m \, \hbar$$



Mécanique quantique

L'électron est décrit par une onde : $\Psi(\mathbf{x}, t) : \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{C}$

La description complète de la fonction d'onde de l'électron atomique fait apparaître 3 nombres quantiques

n : quantification de l'énergie *E*

l : quantification du moment cinétique $|\mathbf{L}| = \hbar\sqrt{l(l+1)}$

m : quantification de $L_z = m\hbar = -l\hbar \ \ldots \ 0 \ \ldots \ l\hbar$

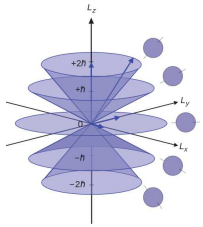
$-l \leq m \leq +l$ *2l +1 valeurs*

→ nombre discret impair de projections du moment cinétique (et magnétique) sur (Oz)

$$\boldsymbol{\mu}_o = \gamma_o \, \mathbf{L}$$

$$|\boldsymbol{\mu}_o| = \gamma_o \hbar \sqrt{l(l+1)}$$

$$\mu_{oz} = \gamma_o \, m \, \hbar$$



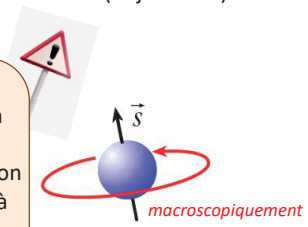
Mécanique quantique

L'électron est décrit par une onde : $\Psi(\mathbf{x}, t) : \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{C}$

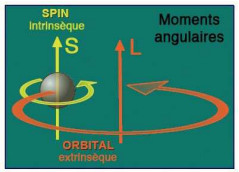
La description complète de la fonction d'onde de l'électron atomique fait apparaître 3 nombres quantiques (n, l, m)

moment cinétique orbital $|\mathbf{L}|$ additionné **d'un moment cinétique intrinsèque = SPIN S** (s'ajoute à **L**)

Le *spin* des particules élémentaires n'a aucun équivalent dans la mécanique classique : on ne peut pas le réduire à un mouvement de rotation de la particule autour de son axe.



macroscopiquement

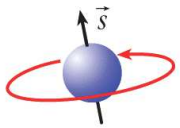


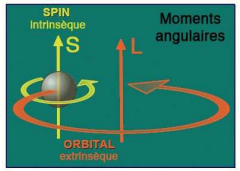
Mécanique quantique

L'électron est décrit par une onde : $\Psi(\mathbf{x}, t, \sigma) : \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^+ \times \binom{+}{-} \rightarrow \mathbb{C}$

La description complète de la fonction d'onde de l'électron atomique fait apparaître 4 nombres quantiques (n, l, m, σ)

moment cinétique orbital $|\mathbf{L}|$ additionné **d'un moment cinétique intrinsèque = SPIN S** (s'ajoute à **L**)





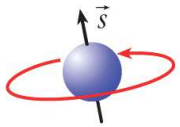
Mécanique quantique

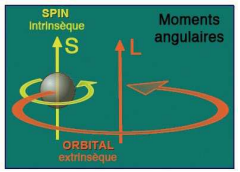
L'électron est décrit par une onde : $\Psi(\mathbf{x}, t, \sigma) : \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^+ \times \binom{+}{-} \rightarrow \mathbb{C}$

La description complète de la fonction d'onde de l'électron atomique fait apparaître 4 nombres quantiques (n, l, m, σ)

moment cinétique intrinsèque = SPIN S (s'ajoute à **L**)

tel que : $|\mathbf{S}| = \hbar\sqrt{s(s+1)}$ (s entier **OU** demi-entier)





s = nombre quantique de spin intrinsèque
σ = nombre quantique magnétique de spin

Mécanique quantique

L'électron est décrit par une onde : $\Psi\,(\mathbf{x}, t, \sigma)\,:\ \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^+ \times \binom{+}{-} \rightarrow \mathbb{C}$

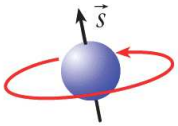
La description complète de la fonction d'onde de l'électron atomique fait apparaître 4 nombres quantiques (n, l, m, σ)

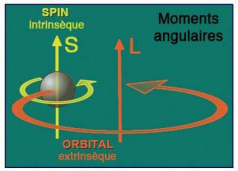
moment cinétique intrinsèque = SPIN S (s'ajoute à **L**)

tel que : $|\mathbf{S}| = \hbar\sqrt{s(s+1)}$ (s entier **OU** demi-entier)

$$S_z = \sigma\hbar = -s\hbar \ldots s\hbar$$

$-s \leq \sigma \leq +s$ *2s +1 valeurs*





Pour s = ½ il y a deux valeurs accessibles: σ = +/- ½.
Pour s = $^3/_2$ il y a quatre valeurs accessibles: σ = +/- ½, +/- $^3/_2$

Mécanique quantique

L'électron est décrit par une onde : $\Psi\,(\mathbf{x}, t, \sigma)\,:\ \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^+ \times \binom{+}{-} \rightarrow \mathbb{C}$

La description complète de la fonction d'onde de l'électron atomique fait apparaître 4 nombres quantiques (n, l, m, σ)

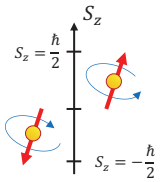
moment cinétique intrinsèque = SPIN S (s'ajoute à **L**)

tel que : $|\mathbf{S}| = \hbar\sqrt{s(s+1)}$ (s entier **OU** demi-entier)

$$S_z = \sigma\hbar = -s\hbar \ldots s\hbar$$

Il n'existe pas de mouvement à l'échelle microscopique qui explique ce moment cinétique intrinsèque.

pour l'électron : $s = \frac{1}{2}$ $\sigma = \pm\frac{1}{2}$



s = nombre quantique de spin intrinsèque
σ = nombre quantique magnétique de spin

Mécanique quantique

L'électron est décrit par une onde : $\Psi\,(\mathbf{x}, t, \sigma)\,:\ \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^+ \times \binom{+}{-} \rightarrow \mathbb{C}$

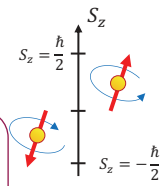
La description complète de la fonction d'onde de l'électron atomique fait apparaître 4 nombres quantiques (n, l, m, σ)

moment cinétique intrinsèque = SPIN S (s'ajoute à **L**)

tel que : $|\mathbf{S}| = \hbar\sqrt{s(s+1)}$ (s entier **OU** demi-entier)

$$S_z = \sigma\hbar = -s\hbar \ldots s\hbar$$

pour l'électron : $s = \frac{1}{2}$ $\sigma = \pm\frac{1}{2}$



Nota:
- proton et neutron présentent un *spin*
- noyau atomique également (*spin résultant* = vecteur somme des *spins* de ses constituants)
- valeur de ces *spins* dépend donc du nombre de masse et du numéro atomique de l'élément.

Mécanique quantique

L'électron est décrit par une onde : $\Psi\,(\mathbf{x}, t, \sigma)\,:\ \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^+ \times \binom{+}{-} \rightarrow \mathbb{C}$

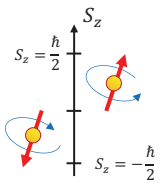
La description complète de la fonction d'onde de l'électron atomique fait apparaître 4 nombres quantiques (n, l, m, σ)

moment cinétique intrinsèque = SPIN S (s'ajoute à **L**)

tel que : $|\mathbf{S}| = \hbar\sqrt{s(s+1)}$ (s entier **OU** demi-entier)

$$S_z = \sigma\hbar = -s\hbar \ldots s\hbar$$

pour l'électron : $s = \frac{1}{2}$ $\sigma = \pm\frac{1}{2}$



il s'y associe un **moment magnétique de spin** $\boldsymbol{\mu}_s$:

$$\boxed{\boldsymbol{\mu}_s = \gamma_s\,\mathbf{S}}$$

γ_s= rapport gyromagnétique de spin

Mécanique quantique

L'électron est décrit par une onde : $\Psi\,(\mathbf{x}, t, \sigma)\,:\ \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^+ \times \binom{+}{-} \rightarrow \mathbb{C}$

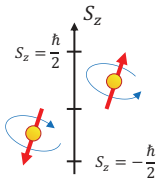
La description complète de la fonction d'onde de l'électron atomique fait apparaître 4 nombres quantiques (n, l, m, σ)

moment cinétique intrinsèque = SPIN S (s'ajoute à **L**)

tel que : $|\mathbf{S}| = \hbar\sqrt{s(s+1)}$ (s entier **OU** demi-entier)

$$S_z = \sigma\hbar = -s\hbar \ldots s\hbar$$

pour l'électron : $s = \frac{1}{2}$ $\sigma = \pm\frac{1}{2}$



il s'y associe un **moment magnétique de spin** $\boldsymbol{\mu}_s$:

$$\boxed{\boldsymbol{\mu}_s = \gamma_s\,\mathbf{S} = g\,\gamma_o\,\mathbf{S}}$$

$g \simeq 2$

facteur de Landé de spin électronique (électron libre)

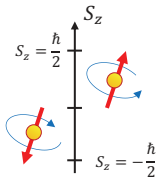
γ_s= rapport gyromagnétique de spin $\bar{\gamma}_s \simeq 28\ \mathrm{GHz\ T^{-1}}$

Mécanique quantique

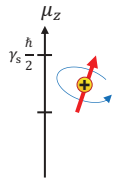
L'électron est décrit par une onde : $\Psi\,(\mathbf{x}, t, \sigma)\,:\ \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^+ \times \binom{+}{-} \rightarrow \mathbb{C}$

La description complète de la fonction d'onde de l'électron atomique fait apparaître 4 nombres quantiques (n, l, m, σ)

Rappels: $S_z = \sigma\hbar = -s\hbar \ldots s\hbar$ $\sigma = \pm\frac{1}{2}$



l'électron : moments intrinsèques de spin → **cinétique S** / **magnétique** $\boldsymbol{\mu}_s$



$$\boxed{\boldsymbol{\mu}_s = \gamma_s\,\mathbf{S}}$$

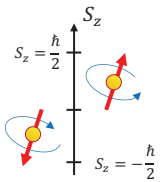
+: état « up », état pseudo-parallèle

Mécanique quantique

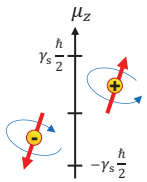
L'électron est décrit par une onde : $\Psi\,(\mathbf{x}, t, \sigma)\,:\ \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^+ \times \binom{+}{-} \rightarrow \mathbb{C}$

La description complète de la fonction d'onde de l'électron atomique fait apparaître 4 nombres quantiques (n, l, m, σ)

Rappels: $S_z = \sigma\hbar = -s\hbar \ldots s\hbar$ $\sigma = \pm\frac{1}{2}$



l'électron : moments intrinsèques de spin → **cinétique S** / **magnétique** $\boldsymbol{\mu}_s$

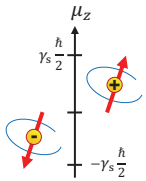


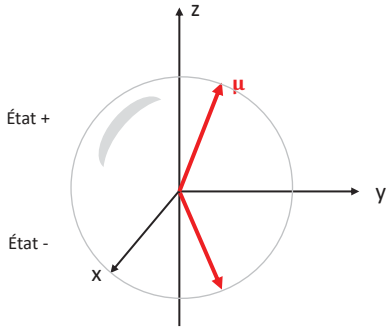
$$\boxed{\boldsymbol{\mu}_s = \gamma_s\,\mathbf{S}}$$

+: état « up », état pseudo-parallèle
-: état « down », état pseudo-antiparallèle

Mécanique quantique

Projection du moment magnétique de spin $\boxed{\boldsymbol{\mu}_s = \gamma_s\,\mathbf{S}}$ → $\mu_z = \gamma_s\,S_z$



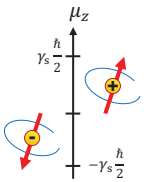


+: état « up », état pseudo-parallèle
-: état « down », état pseudo-antiparallèle

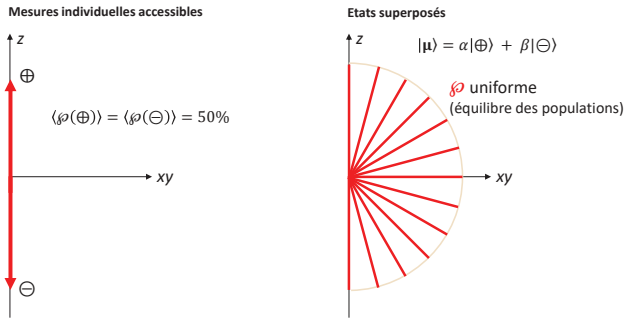
Autant de probabilité pour être up que pour être down → en moyenne: $\mu_x = 0$
$\mu_y = 0$

Mécanique quantique

Projection du moment magnétique de spin $\boldsymbol{\mu}_s = \gamma_s \mathbf{S}$ → $\mu_z = \gamma_s S_z$



En absence de champ magnétique intense:

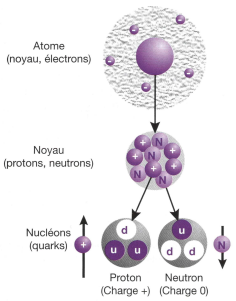


Vrai pour l'électron <u>mais</u> vrai aussi pour toute particule élémentaire de spin ½

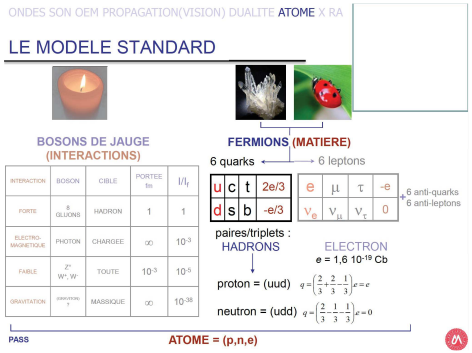
Mécanique quantique

Autre(s) particule(s) élémentaire(s) qui porte(nt) un spin:

Les nucléons sont constitués de sous-particules + et – « en rotation », les quarks, dont la distribution de charges va induire un $\boldsymbol{\mu}$



Comprendre l'IRM. 8ème édition. 2018. B. KASTLEr, D. VETTER

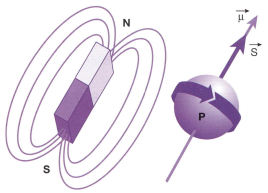


Cours PASS 2020-2021 UE7-Biophysique Pr D. MARIANO-GOULART

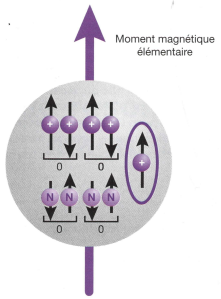
Mécanique quantique

Autre(s) particule(s) élémentaire(s) qui porte(nt) un spin:

<u>Proton = noyau d'hydrogène</u>



<u>Noyau possédant des propriétés magnétiques</u>

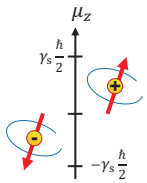


Comprendre l'IRM. 8ème édition. 2018. B. KASTLEr, D. VETTER

Mécanique quantique

Autre particule élémentaire qui porte un spin: le noyau d'hydrogène

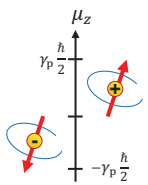
<u>Electron</u>



$\boldsymbol{\mu}_s = \gamma_s \mathbf{S}$ → $\mu_z = \gamma_s S_z$

$\bar{\gamma}_s \cong 28\ \mathrm{GHz}\ T^{-1}$

<u>Noyau d'hydrogène</u>



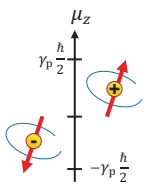
$\boldsymbol{\mu} = \gamma_p \mathbf{S}$ → $\mu_z = \gamma_p S_z$

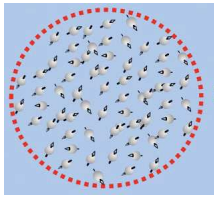
$\bar{\gamma}_p = 42{,}6\ \mathrm{MHz}\ T^{-1}$

Rappel: γ_s= rapport gyromagnétique de spin = $g\ \gamma_0$
g: facteur de Landé de spin électronique (électron libre)

Mécanique quantique

Considérations énergétiques

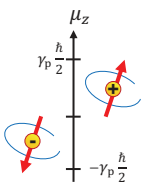


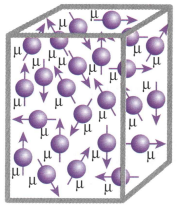


Mécanique quantique

Considérations énergétiques

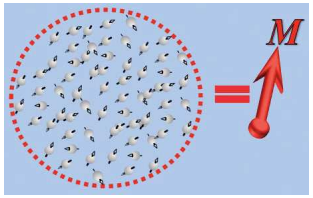
$\mathbf{B} = 0$





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

$\vec{M} = 0$



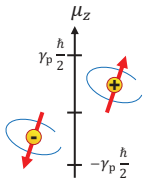
$$M = \sum \mu_z$$

Comprendre l'IRM. 8ème édition. 2018. B. KASTLER, D. VETTER

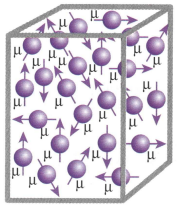
Mécanique quantique

Considérations énergétiques

$\mathbf{B} = 0$

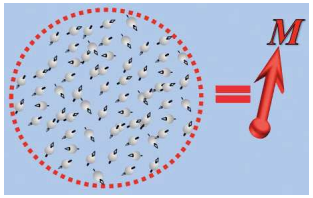


$$E_+ = E_- = \hat{E}$$



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

$\vec{M} = 0$



$$M = \sum \mu_z$$

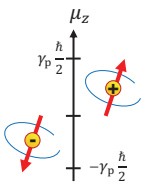
Mécanique quantique

Considérations énergétiques

$\mathbf{B} = 0$

$\mathbf{B} > 0$

$$\hat{E} - \boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B} = \hat{E} - \gamma_p S_z B$$



$$E_+ = E_- = \hat{E}$$

+: état « up », état pseudo-parallèle

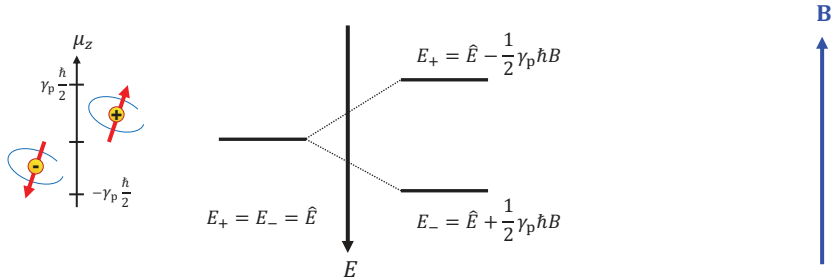
-: état « down », état pseudo-antiparallèle

Mécanique quantique

Considérations énergétiques

$\mathbf{B} = 0$ $\mathbf{B} > 0$

$$\hat{E} - \boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B} = \hat{E} - \gamma_p S_z B$$



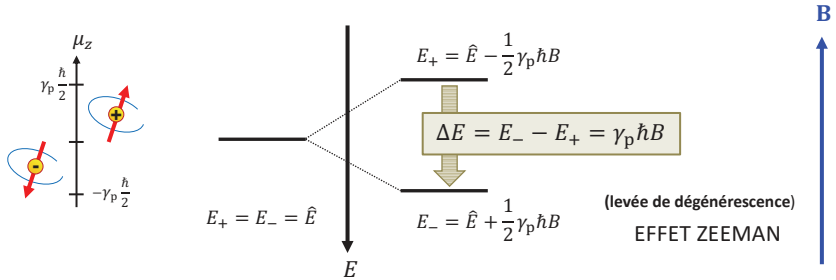
+: état « up », état pseudo-parallèle
-: état « down », état pseudo-antiparallèle

Mécanique quantique

Considérations énergétiques

$\mathbf{B} = 0$ $\mathbf{B} > 0$

$$\hat{E} - \boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B} = \hat{E} - \gamma_p S_z B$$

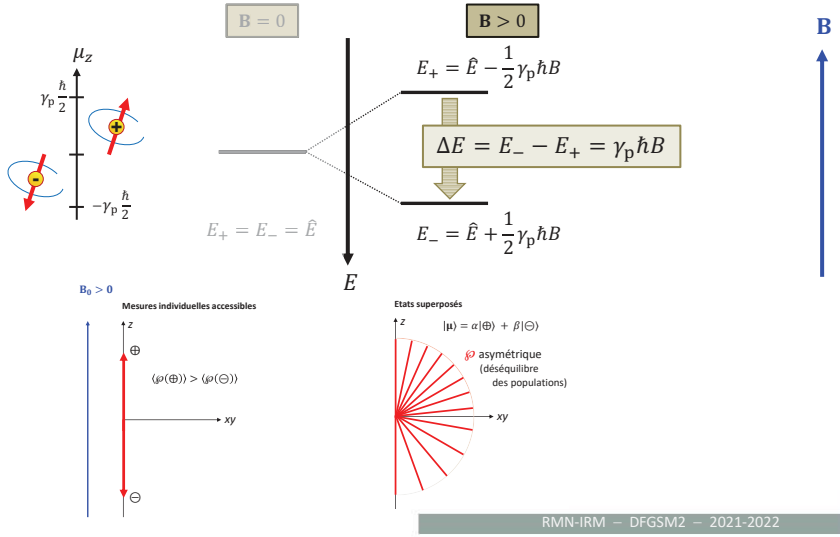


+: état « up », état pseudo-parallèle
-: état « down », état pseudo-antiparallèle

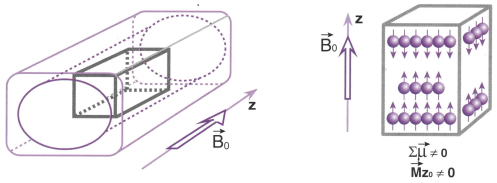
Mécanique quantique

Considérations énergétiques

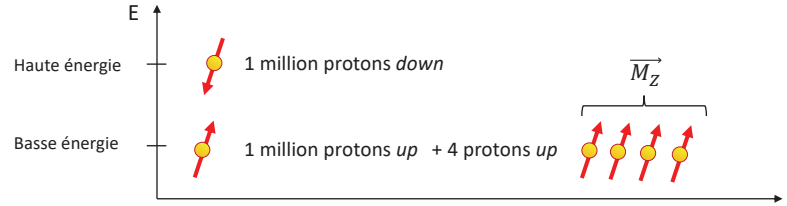
$\mathbf{B} = 0$ $\mathbf{B} > 0$



Mécanique quantique



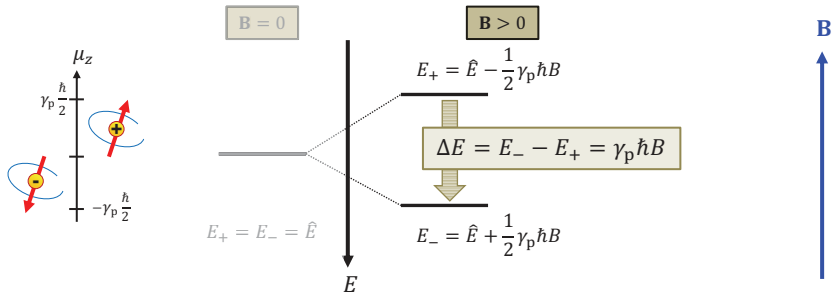
B_0 = 0,5 T



Aimantation résultante positive
et mesurable quand **B** ∃

Mécanique quantique

Considérations énergétiques

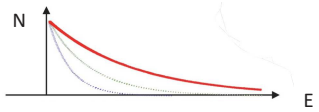


Comment se distribuent les spins des particules sur des états énergétiques différents ?

T° basse

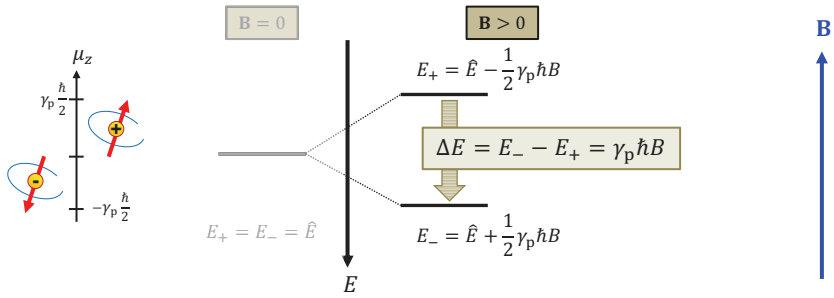
T° moyenne

T° haute



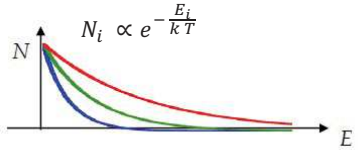
Mécanique quantique

Considérations énergétiques



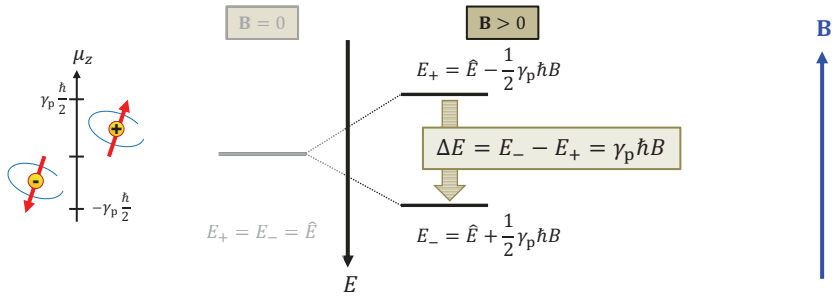
Comment se distribuent les spins des particules sur des états énergétiques différents ?

Loi de distribution de Boltzman



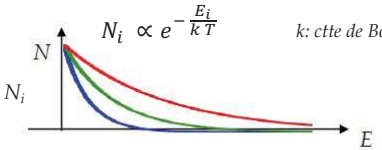
Mécanique quantique

Considérations énergétiques



Comment se distribuent les spins des particules sur des états énergétiques différents ?

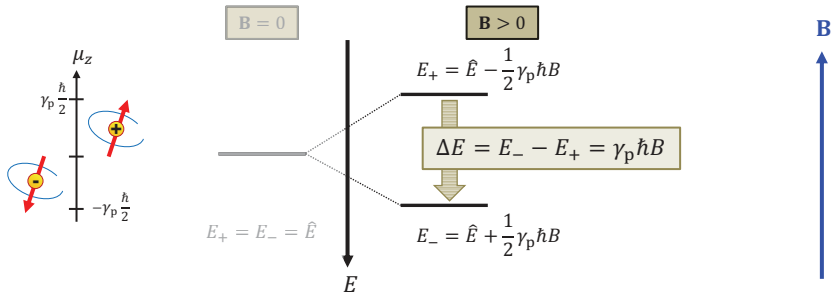
Particules indépendantes
Etats i d'énergie E_i
Nombre de spins dans chaque état énergétique N_i
Température suffisante T > 0 K
Equilibre thermique



k: cte de Boltzmann

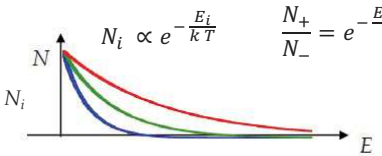
Mécanique quantique

Considérations énergétiques



Comment se distribuent les spins des particules sur des états énergétiques différents ?

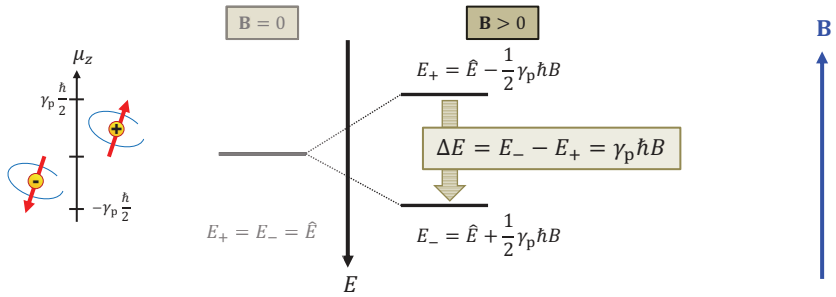
Particules indépendantes
Etats i d'énergie E_i
Nombre de spins dans chaque état énergétique N_i
Température suffisante T > 0 K
Equilibre thermique



$$\frac{N_+}{N_-} = e^{-\frac{E_+ - E_-}{kT}} = e^{\frac{\Delta E}{kT}}$$

Mécanique quantique

Considérations énergétiques



Comment se distribuent les spins des particules sur des états énergétiques différents ?

Particules indépendantes
Etats i d'énergie E_i
Nombre de spins dans chaque état énergétique N_i
Température suffisante T > 0 K
Equilibre thermique

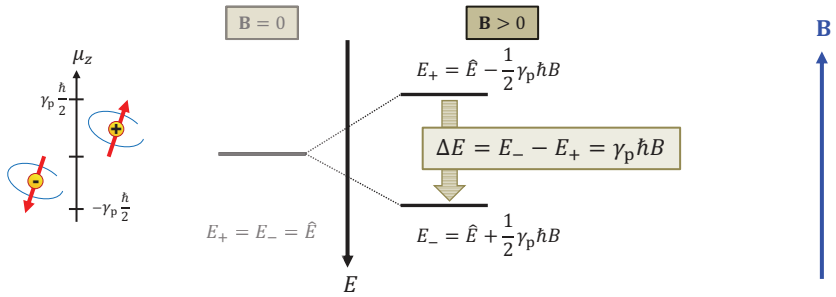
$$N_i \propto e^{-\frac{E_i}{kT}}$$

$$\frac{N_+}{N_-} = e^{\frac{\Delta E}{kT}}$$

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-} = \frac{\frac{N_+}{N_-} - 1}{\frac{N_+}{N_-} + 1} = \frac{e^{\frac{\Delta E}{kT}} - 1}{e^{\frac{\Delta E}{kT}} + 1} \simeq \frac{\frac{\Delta E}{kT}}{\frac{\Delta E}{kT} + 2} = \frac{\Delta E}{kT} \times \frac{1}{\frac{\Delta E}{kT} + 2} \sim \frac{\Delta E}{2kT}$$

Mécanique quantique

Considérations énergétiques



Comment se distribuent les spins des particules sur des états énergétiques différents ?

Particules protoniques indépendantes
Etats i d'énergie E_i
Nombre de spins dans chaque état énergétique N_i
Pour T =300 K
Equilibre thermique
B = 1 T

$$\frac{\Delta N}{N} \sim \frac{\Delta E}{2\,k\,T} \sim \frac{1}{10^6}$$

DFGSM2 2021-2022
UE Biophysique et bases de l'imagerie

Plan du cours

Champ et interactions

Modèle de l'électron

Mécanique quantique

Magnétisme nucléaire

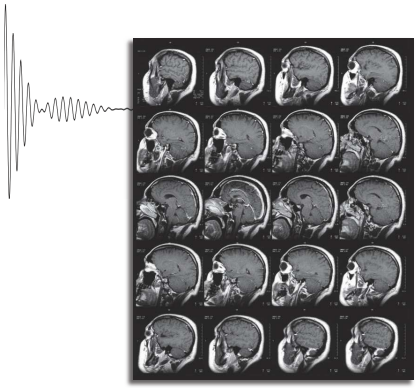
RMN – principe, séquence, contraste

Formation de l'image

Séquences d'acquisition

Dispositifs d'IRM

Risques de l'IRM



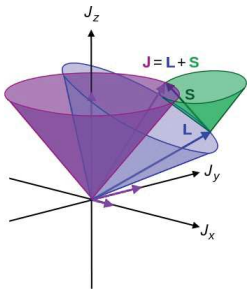
Magnétisme

Magnétisme atomique essentiellement électronique

Electrons atomiques:

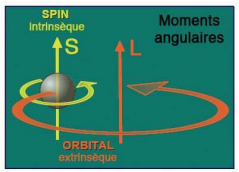
On se souvient, pour un électron, que:

moment cinétique orbital $|\mathbf{L}|$ additionné **d'un moment cinétique intrinsèque = SPIN S**



Moment cinétique total **J**

$\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$



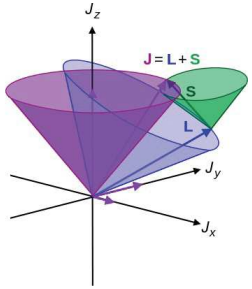
Magnétisme

Magnétisme atomique essentiellement électronique

Electrons atomiques:

On se souvient, pour un électron, que:

moment cinétique orbital $|\mathbf{L}|$ additionné **d'un moment cinétique intrinsèque = SPIN S**



Moment cinétique total $\mathbf{J}$

$\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$

$|\mathbf{S}| = \hbar\sqrt{s(s+1)}$

$|\mathbf{L}| = \hbar\sqrt{l(l+1)}$

$L_z = m\hbar = -l\hbar \ \dots\ 0\ \dots\ l\hbar$

$S_z = \sigma\hbar = -s\hbar \dots s\hbar$

(n, l, m, σ)

n entier positif >0

$0 \le l \le n-1$

$-l \le m \le +l$

$s = \frac{1}{2} \quad \sigma = \pm\frac{1}{2}$

$j = |l - s|, \dots, l + s$

$|\mathbf{J}| = \hbar\sqrt{j(j+1)}$

$J_z = m_j\hbar = -j\hbar \ \dots\ 0\ \dots j\hbar$

$j = l - \frac{1}{2}, l + \frac{1}{2}$

Etat complet (n, l, j, m_j)

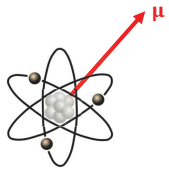
Magnétisme

Magnétisme atomique essentiellement électronique

Electrons atomiques:

- Moment cinétique total $\mathbf{J}$
- Moment magnétique total permanent $\boldsymbol{\mu}$

$\boldsymbol{\mu} = \gamma_e \mathbf{J} \qquad \overline{\gamma_e} \sim \mathrm{GHz\ T^{-1}}$



$\boldsymbol{\mu} = \gamma_e \mathbf{J} = g\,\gamma_o \mathbf{J}$

γ_e rapport gyromagnétique global
g facteur de Landé électronique

Nota: pour un électron libre $\gamma_e = \gamma_s$

$$g = \frac{\gamma_e}{\gamma_o}$$

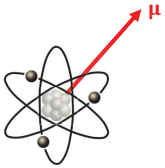
Magnétisme

Magnétisme atomique essentiellement électronique

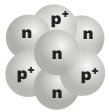
Electrons atomiques:

- Moment cinétique total $\mathbf{J}$
- Moment magnétique total permanent $\boldsymbol{\mu}$

$\boldsymbol{\mu} = \gamma_e \mathbf{J} \qquad \overline{\gamma_e} \sim \mathrm{GHz\ T^{-1}}$



Noyau = protons + neutrons



- Moment cinétique total du noyau $\mathbf{J}$: « SPIN »
- Moment magnétique permanent du noyau $\boldsymbol{\mu}$: « SPIN »

$\boldsymbol{\mu} = \gamma_N \mathbf{J} \qquad \overline{\gamma_N} \sim \mathrm{MHz\ T^{-1}}$

Magnétisme

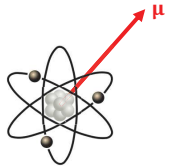
Magnétisme atomique essentiellement électronique

Electrons atomiques:

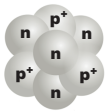
- Moment cinétique total $\mathbf{J}$
- Moment magnétique total permanent $\boldsymbol{\mu}$

$\boldsymbol{\mu} = \gamma_e \mathbf{J} \qquad \overline{\gamma_e} \sim \mathrm{GHz\ T^{-1}}$

$\mu_B = \frac{e\hbar}{2\,m_e}$ [JT^{-1}] *ou* [Am^2]



Noyau = protons + neutrons



- Moment cinétique total du noyau $\mathbf{J}$: « SPIN »
- Moment magnétique permanent du noyau $\boldsymbol{\mu}$: « SPIN »

$\boldsymbol{\mu} = \gamma_N \mathbf{J} \qquad \overline{\gamma_N} \sim \mathrm{MHz\ T^{-1}}$

$\gamma_N\hbar = g_N\mu_N$

$\mu_N = \frac{e\hbar}{2\,m_p}$ [JT^{-1}] *ou* [Am^2]

magnéton nucléaire $\mu_N \ll \mu_B$

$m_p \gg m_e$ *de l'ordre de 2000 fois*

Magnétisme

Magnétisme atomique essentiellement électronique

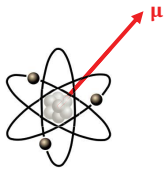
Electrons atomiques:

- Moment cinétique total $\mathbf{J}$
- Moment magnétique total permanent $\boldsymbol{\mu}$

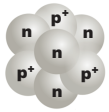
$\boldsymbol{\mu} = \gamma_e \mathbf{J}$ $\quad \overline{\gamma_e} \sim \mathrm{GHz\ T^{-1}}$

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2\,m_e}$$

[JT^{-1}] *ou* [Am^2]



Noyau = protons + neutrons



- Moment cinétique total du noyau $\mathbf{J}$: « SPIN »
- Moment magnétique permanent du noyau $\boldsymbol{\mu}$: « SPIN »

$\boldsymbol{\mu} = \gamma_N \mathbf{J}$ $\quad \overline{\gamma_N} \sim \mathrm{MHz\ T^{-1}}$

$\gamma_N \hbar = g_N \mu_N$

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2\,m_p}$$

$$\gamma_N = g_N \frac{e}{2m_p}$$

Proton: $g = 5{,}6$

Neutron: $g = -3{,}8$

magnéton nucléaire $\mu_N \ll \mu_B$

$m_p \gg m_e$ *de l'ordre de 2000 fois*

Magnétisme

Magnétisme atomique essentiellement électronique

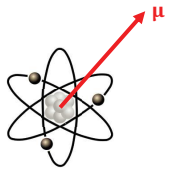
Electrons atomiques:

- Moment cinétique total $\mathbf{J}$
- Moment magnétique total permanent $\boldsymbol{\mu}$

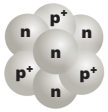
$\boldsymbol{\mu} = \gamma_e \mathbf{J}$ $\quad \overline{\gamma_e} \sim \mathrm{GHz\ T^{-1}}$

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2\,m_e}$$

[JT^{-1}] *ou* [Am^2]



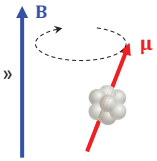
Noyau = protons + neutrons



- Moment cinétique total du noyau $\mathbf{J}$: « SPIN »
- Moment magnétique permanent du noyau $\boldsymbol{\mu}$: « SPIN »

$\boldsymbol{\mu} = \gamma_N \mathbf{J}$ $\quad \overline{\gamma_N} \sim \mathrm{MHz\ T^{-1}}$

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2\,m_p}$$



Précession de Larmor

$\boldsymbol{\omega} = -\gamma_N \mathbf{B}$

Magnétisme nucléaire

Noyau ^{1}H = 1 proton

- Moment cinétique total $\mathbf{J}$: « SPIN »
- Moment magnétique permanent $\boldsymbol{\mu}$: « SPIN »
- j = ½
- 2j+1 orientations

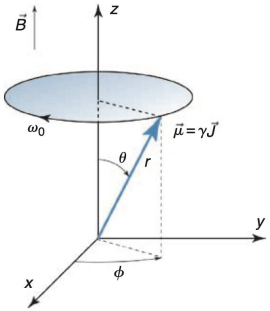
$\boldsymbol{\mu} = \gamma_p \mathbf{J}$

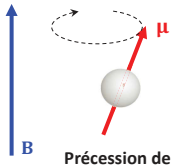
$\mu_z = \gamma_p J_z = \gamma_p m_j \hbar$

$$\Delta E = \gamma_p \hbar B = h\nu$$

Proton: $g = 5{,}6$

$\overline{\gamma_p} = 42{,}6\ \mathrm{MHz}\ T^{-1}$





Précession de Larmor

$\boldsymbol{\omega} = -\gamma_p \mathbf{B}$

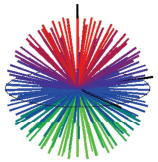
$B = 1{,}5\ \mathrm{T}$: $\nu = 64\ \mathrm{MHz}$
$B = 3\ \mathrm{T}$: $\nu = 128\ \mathrm{MHz}$
ondes radio

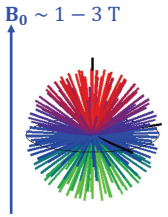
Nota:
$\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$
$|\mathbf{J}| = \hbar\sqrt{j(j+1)}$
$j = |l - s|, \ldots, l + s$
$j = l - \frac{1}{2}, l + \frac{1}{2}$
$J_z = m_j\hbar = -j\hbar \ \ldots\ 0\ \ldots j\hbar$
Etat complet (n, l, j, m_j)

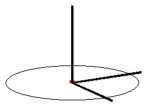
$$\nu = \frac{\omega}{2\pi}$$ [Hz]

Magnétisme nucléaire

Noyau ^{1}H = 1 proton







Magnétisme nucléaire

Nucleus	*Spin = j*	*Landé factor*
proton p	1/2	5.5883
neutron n	1/2	−3.8263
deuteron $^{2}_{1}D$	1	0.85742
$^{3}_{2}He$	1/2	−4.255
$^{4}_{2}He$	0	—
$^{12}_{6}C$	0	—
$^{16}_{8}O$	0	—
$^{39}_{19}K$	3/2	0.2609
$^{67}_{30}Zn$	5/2	0.35028
$^{85}_{37}Rb$	5/2	0.54108
$^{129}_{54}Xe$	1/2	−1.5536
$^{133}_{55}Cs$	7/2	0.7369
$^{199}_{80}Hg$	1/2	1.0054
$^{201}_{80}Hg$	3/2	−0.37113

- **Spin dépend de la composition du noyau**

Magnétisme nucléaire

Nucleus	*Spin = j*	*Landé factor*
proton p	1/2	5.5883
neutron n	1/2	−3.8263
deuteron $^{2}_{1}D$	1	0.85742
$^{3}_{2}He$	1/2	−4.255
$^{4}_{2}He$	0	—
$^{12}_{6}C$	0	—
$^{16}_{8}O$	0	—
$^{39}_{19}K$	3/2	0.2609
$^{67}_{30}Zn$	5/2	0.35028
$^{85}_{37}Rb$	5/2	0.54108
$^{129}_{54}Xe$	1/2	−1.5536
$^{133}_{55}Cs$	7/2	0.7369
$^{199}_{80}Hg$	1/2	1.0054
$^{201}_{80}Hg$	3/2	−0.37113

- **Spin dépend de la composition du noyau**
- **Pas de spin ⇔ Pas de magnétisme**

Magnétisme nucléaire

Nucleus	*Spin = j*	*Landé factor*
proton p	1/2	5.5883
neutron n	1/2	−3.8263
deuteron $^{2}_{1}D$	1	0.85742
$^{3}_{2}He$	1/2	−4.255
$^{4}_{2}He$	0	—
$^{12}_{6}C$	0	—
$^{16}_{8}O$	0	—
$^{39}_{19}K$	3/2	0.2609
$^{67}_{30}Zn$	5/2	0.35028
$^{85}_{37}Rb$	5/2	0.54108
$^{129}_{54}Xe$	1/2	−1.5536
$^{133}_{55}Cs$	7/2	0.7369
$^{199}_{80}Hg$	1/2	1.0054
$^{201}_{80}Hg$	3/2	−0.37113

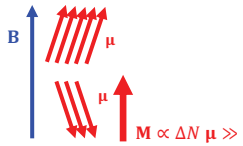
- **Spin dépend de la composition du noyau**
- **Pas de spin ⇔ Pas de magnétisme**
- **$^{1}H = p^{+}$: magnétisme maximal**

Magnétisme nucléaire

Nucleus	*Spin = j*	*Landé factor*
proton p	1/2	5.5883
neutron n	1/2	−3.8263
deuteron $^{2}_{1}D$	1	0.85742
$^{3}_{2}He$	1/2	−4.255
$^{4}_{2}He$	0	—
$^{12}_{6}C$	0	—
$^{16}_{8}O$	0	—
$^{39}_{19}K$	3/2	0.2609
$^{67}_{30}Zn$	5/2	0.35028
$^{85}_{37}Rb$	5/2	0.54108
$^{129}_{54}Xe$	1/2	−1.5536
$^{133}_{55}Cs$	7/2	0.7369
$^{199}_{80}Hg$	1/2	1.0054
$^{201}_{80}Hg$	3/2	−0.37113

- **Spin dépend de la composition du noyau**
- **Pas de spin ⇔ Pas de magnétisme**
- **$^{1}H = p^{+}$: magnétisme maximal**

$$g \gg \begin{cases} \gamma \gg \Rightarrow \boldsymbol{\mu} \gg \\ \dfrac{\Delta N}{N} \propto \Delta E \gg \end{cases}$$

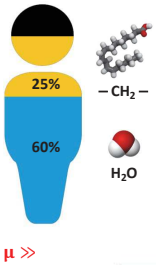


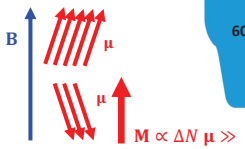
Magnétisme nucléaire

Nucleus	*Spin = j*	*Landé factor*
proton p	1/2	5.5883
neutron n	1/2	−3.8263
deuteron $^{2}_{1}D$	1	0.85742
$^{3}_{2}He$	1/2	−4.255
$^{4}_{2}He$	0	—
$^{12}_{6}C$	0	—
$^{16}_{8}O$	0	—
$^{39}_{19}K$	3/2	0.2609
$^{67}_{30}Zn$	5/2	0.35028
$^{85}_{37}Rb$	5/2	0.54108
$^{129}_{54}Xe$	1/2	−1.5536
$^{133}_{55}Cs$	7/2	0.7369
$^{199}_{80}Hg$	1/2	1.0054
$^{201}_{80}Hg$	3/2	−0.37113

- **Spin dépend de la composition du noyau**
- **Pas de spin ⇔ Pas de magnétisme**
- **$^{1}H = p^{+}$: magnétisme maximal**

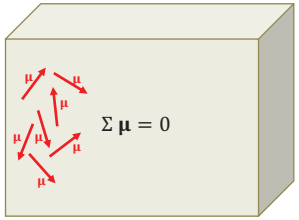
$$g \gg \begin{cases} \gamma \gg \Rightarrow \boldsymbol{\mu} \gg \\ \dfrac{\Delta N}{N} \propto \Delta E \gg \end{cases}$$





Magnétisme dans la matière

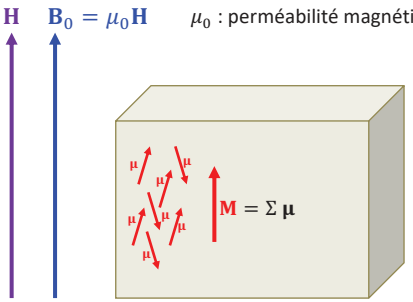
(dû aux électrons)



Magnétisme dans la matière

(dû aux électrons)

$\mathbf{H}$ $\quad \mathbf{B}_0 = \mu_0 \mathbf{H}$ $\quad \mu_0$: perméabilité magnétique du vide [Am⁻¹]

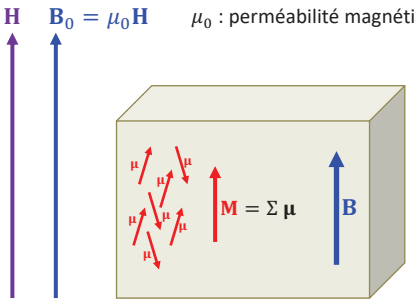


H: champ magnétique externe
B ou **B_0**: champ d'induction magnétique

Magnétisme dans la matière

(dû aux électrons)

$\mathbf{H}$ $\quad \mathbf{B}_0 = \mu_0 \mathbf{H}$ $\quad \mu_0$: perméabilité magnétique du vide



$$\mathbf{B} = \mu\, \mathbf{H}$$

μ : perméabilité magnétique du matériau

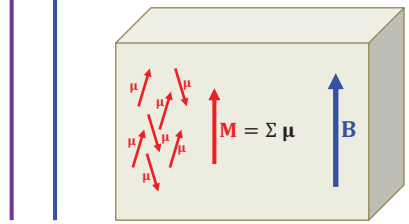
$$= \mu_0\,(1 + \chi)\, \mathbf{H}$$

χ : susceptibilité magnétique du matériau

Magnétisme dans la matière

(dû aux électrons)

$\mathbf{H}$ $\mathbf{B}_0 = \mu_0 \mathbf{H}$ μ_0 : perméabilité magnétique du vide



$$\mathbf{B} = \mu\, \mathbf{H}$$
$$= \mu_0\, (1 + \chi)\, \mathbf{H}$$
$$= \mu_0\, (\mathbf{H} + \mathbf{H}')$$

μ : perméabilité magnétique du matériau

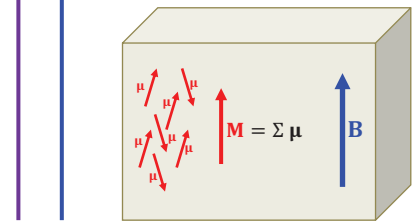
χ : susceptibilité magnétique

$\mathbf{H}' = \frac{d\mathbf{M}}{dV}$: aimantation volumique

Magnétisme dans la matière

(dû aux électrons)

$\mathbf{H}$ $\mathbf{B}_0 = \mu_0 \mathbf{H}$ μ_0 : perméabilité magnétique du vide



$$\mathbf{B} = \mu\, \mathbf{H}$$
$$= \mu_0\, (1 + \chi)\, \mathbf{H}$$
$$= \mu_0\, (\mathbf{H} + \mathbf{H}')$$

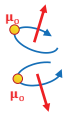
μ : perméabilité magnétique du matériau

χ : susceptibilité magnétique

$\mathbf{H}' = \frac{d\mathbf{M}}{dV}$: aimantation volumique

Diamagnétisme

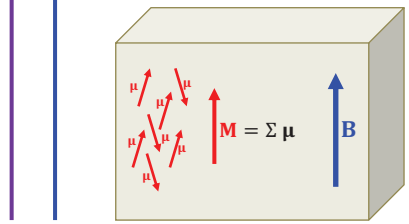
Doublets d'électrons (tous les électrons sont appariés)
Absence de moment permanent $\mathbf{J} = \mathbf{0}$



Magnétisme dans la matière

(dû aux électrons)

$\mathbf{H}$ $\mathbf{B}_0 = \mu_0 \mathbf{H}$ μ_0 : perméabilité magnétique du vide



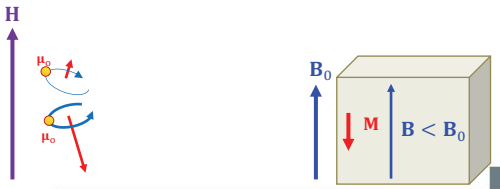
$$\mathbf{B} = \mu\, \mathbf{H}$$
$$= \mu_0\, (1 + \chi)\, \mathbf{H}$$

μ : perméabilité magnétique du matériau

χ : susceptibilité magnétique

Diamagnétisme

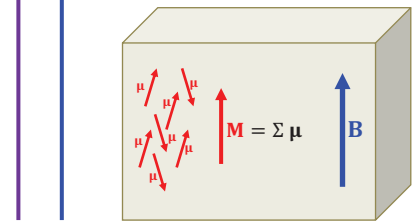
Doublets d'électrons (tous les électrons sont appariés)
Absence de moment permanent $\mathbf{J} = \mathbf{0}$
Modification du mouvement orbital



Magnétisme dans la matière

(dû aux électrons)

$\mathbf{H}$ $\mathbf{B}_0 = \mu_0 \mathbf{H}$ μ_0 : perméabilité magnétique du vide



$$\mathbf{B} = \mu\, \mathbf{H}$$
$$= \mu_0\, (1 + \chi)\, \mathbf{H}$$

μ : perméabilité magnétique du matériau

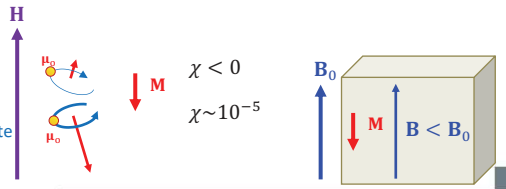
χ : susceptibilité magnétique

Diamagnétisme

Doublets d'électrons
Absence de moment permanent $\mathbf{J} = 0$
Modification du mouvement orbital

Cuivre, plomb, eau et tissus biologiques, graphite

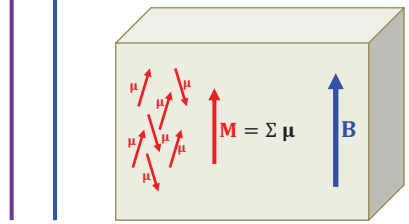
Courant diamagnétique s'oppose à B_0 et induit un blindage



Magnétisme dans la matière

(dû aux électrons)

$\mathbf{H}$ $\mathbf{B}_0 = \mu_0 \mathbf{H}$ μ_0 : perméabilité magnétique du vide



$\mathbf{B} = \mu\, \mathbf{H}$

$= \mu_0\, (1 + \chi)\, \mathbf{H}$

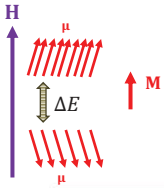
μ : perméabilité magnétique du matériau

χ : susceptibilité magnétique

Paramagnétisme

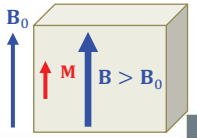
Electrons de valence non appariés
Moment permanent $\mathbf{J}$
Alignement sur $\mathbf{B_0}$

Ions métalliques, radicaux libres, certains produits de contraste
Courant paramagnétique augmente B_0 et induit un déblindage



$\chi > 0$

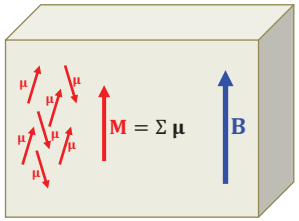
$\chi \sim 10^{-3}$



Magnétisme dans la matière

(dû aux électrons)

$\mathbf{H}$ $\mathbf{B}_0 = \mu_0 \mathbf{H}$ μ_0 : perméabilité magnétique du vide



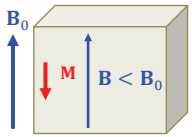
$\mathbf{B} = \mu\, \mathbf{H}$

$= \mu_0\, (1 + \chi)\, \mathbf{H}$

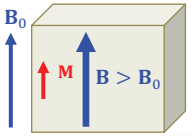
μ : perméabilité magnétique du matériau

χ : susceptibilité magnétique

Diamagnétisme



Paramagnétisme



Le magnétisme des particules qui sont dans le noyau est bien plus faible que les propriétés magnétiques du nuage électronique

Magnétisme nucléaire ou électronique?

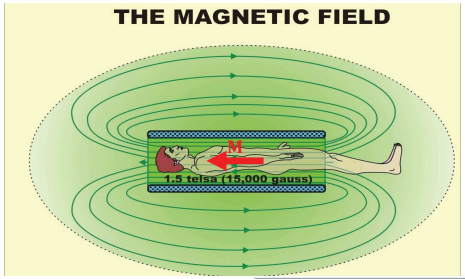
Magnétisme atomique essentiellement électronique

Eléments avec symétrie moléculaire insuffisante ou électrons célibataires:

$\boldsymbol{\mu}_e$ permanent $B_{matériau} \approx 1$ mT pour $B = 1$T dû au magnétique électronique

Le noyau d'^{1}H:

$\gamma \ll \gamma_e$ $\frac{\Delta N}{N} \ll$ $\boldsymbol{\mu} \ll$ $B_{matériau} \approx 1$ nT pour $B = 1$T dû au magnétique nucléaire



Magnétisme nucléaire ou électronique?

Magnétisme atomique essentiellement électronique

Eléments avec symétrie moléculaire insuffisante ou électrons célibataires:

$\boldsymbol{\mu}_e$ permanent $B_{matériau} \approx 1$ mT pour $B = 1$T dû au magnétique électronique

Le noyau d'^{1}H:

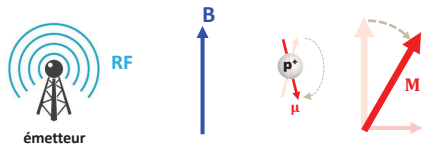
$\gamma \ll \gamma_e$ $\frac{\Delta N}{N} \ll$ $\boldsymbol{\mu} \ll$ $B_{matériau} \approx 1$ nT pour $B = 1$T dû au magnétique nucléaire

Toutes les particules qui portent un spin peuvent entrer en résonnance dans un champ magnétique

Précession de Larmor :

$\boldsymbol{\omega} = -\gamma\, \mathbf{B}$ [rad.s^{-1}]

$\boldsymbol{\nu} = -\bar{\gamma}\, \mathbf{B}$ [Hz]



RF à $\boldsymbol{\nu}$ donnée

Magnétisme nucléaire ou électronique?

Magnétisme atomique essentiellement électronique

Eléments avec symétrie moléculaire insuffisante ou électrons célibataires:

$B = 1\ \mathrm{T}:\ \nu \sim \mathrm{GHz}$ (micro-onde) = Résonnance paramagnétique électronique

Le noyau d'^{1}H:

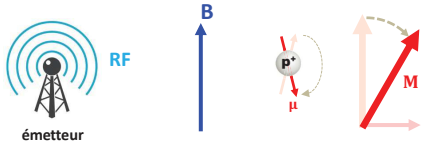
$B = 1\ \mathrm{T}:\ \nu = 42{,}6\ \mathrm{MHz}$ = Résonnance magnétique nucléaire

Toutes les particules qui portent un spin peuvent entrer en résonnance dans un champ magnétique

Précession de Larmor :

$\boldsymbol{\omega = -\gamma\, \mathbf{B}}$ [rad.s^{-1}]

$\boldsymbol{\nu = -\bar{\gamma}\, \mathbf{B}}$ [Hz]



RF à ν donnée

DFGSM2 2021-2022

UE Biophysique et bases de l'imagerie

Plan du cours

Champ et interactions

Modèle de l'électron

Mécanique quantique

Magnétisme nucléaire

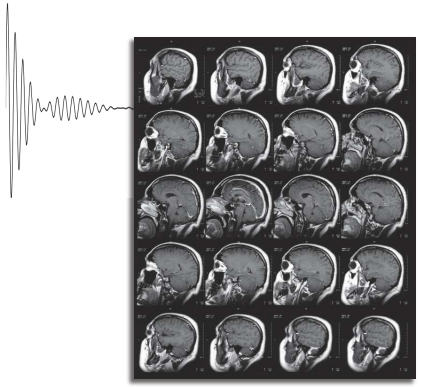
RMN – principe, séquence, contraste

Formation de l'image

Séquences d'acquisition

Dispositifs d'IRM

Risques de l'IRM



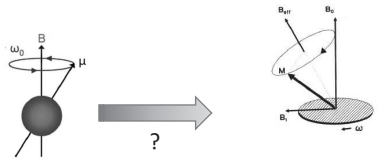
RMN - principe

Prix Nobel

Lauréats	*Année*	*Discipline*	*Travaux*
O. Stern	1943	Physique	Moment magnétique du proton (1933)
I. Rabi	1944	Physique	RMN
F. Bloch & E. Purcell	1952	Physique	RMN

F. Bloch (Stanford)

E. Purcell (Harvard)



Cours Bases de la RMN. École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris

RMN - principe

Prix Nobel

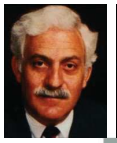
Lauréats	*Année*	*Discipline*	*Travaux*
O. Stern	1943	Physique	Moment magnétique du proton (1933)
I. Rabi	1944	Physique	RMN
F. Bloch & E. Purcell	1952	Physique	RMN
R. Ernst	1991	Chimie	Spectroscopie RMN haute résolution
P. Lauterbur & P. Mansfield	2003	Médecine	IRM

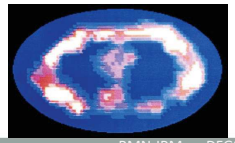
F. Bloch (Stanford)

E. Purcell (Harvard)

et bien d'autres…

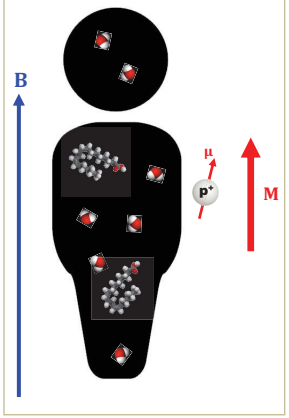
R. DAMADIAN

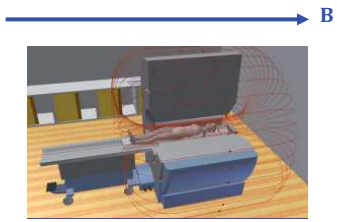




RMN - principe

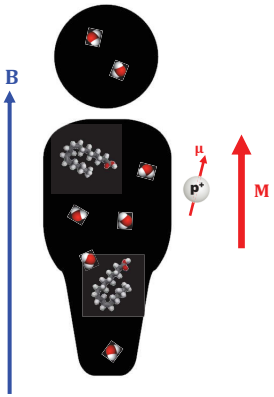
1. Préparation (aimantation)





RMN - principe

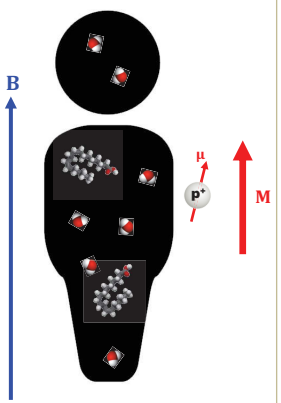
1. Préparation (aimantation)



- Paramagnétisme électronique
- Magnétisme électronique: champ magnétique induit 1mT pour B 1 T
- Magnétisme nucléaire: champ magnétique induit 1nT pour B = 1 T

RMN - principe

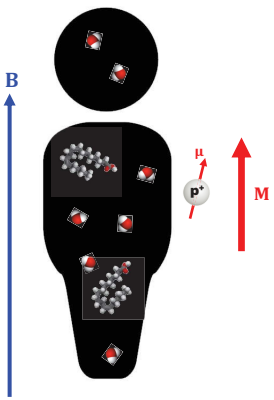
1. Préparation (aimantation)



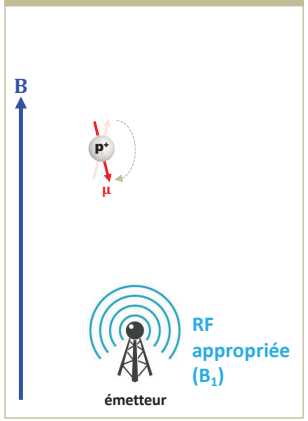
- Paramagnétisme électronique
- Magnétisme électronique: champ magnétique induit 1mT pour B 1 T
- Magnétisme nucléaire: champ magnétique induit 1nT pour B = 1 T
- Inhomogénéités de champ >> 1nT

RMN - principe

1. Préparation (aimantation)

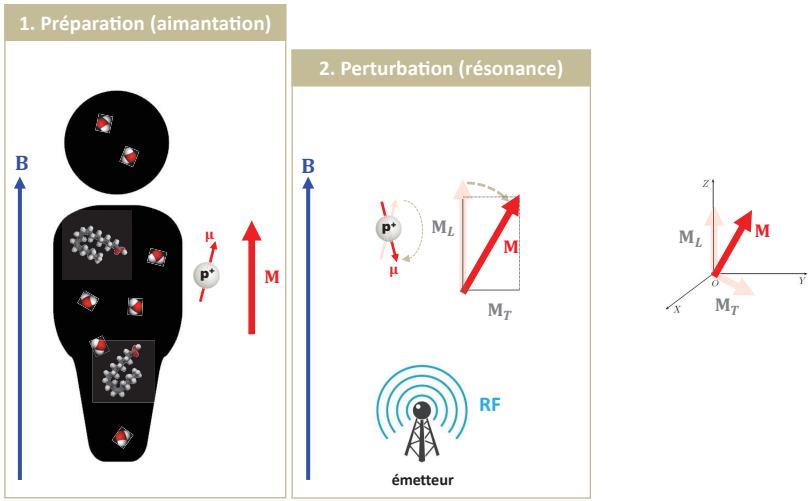


2. Perturbation (résonance)

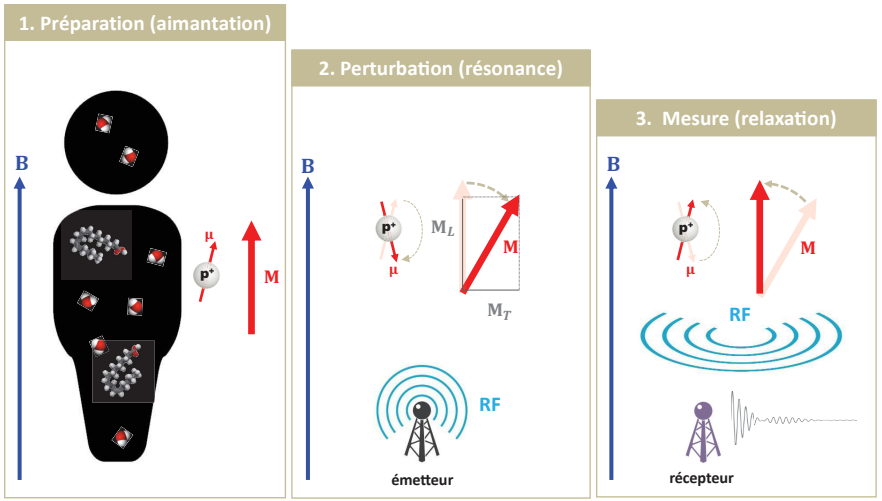


Provoquer des transitions de spins entre l'état de basse énergie et celui de haute énergie ⇔ Sortir le système de spins de son équilibre

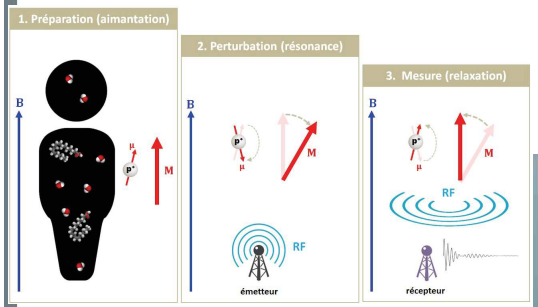
RMN - principe



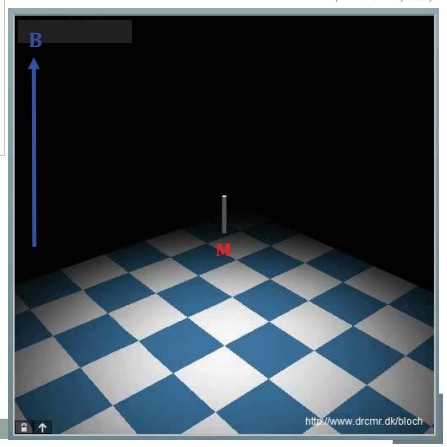
RMN - principe



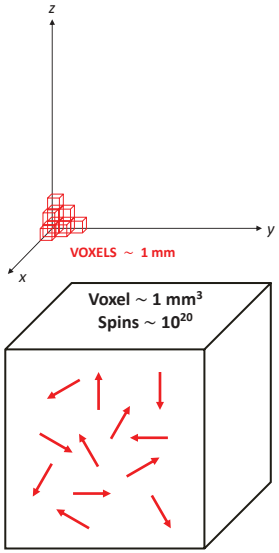
RMN - principe



LG Hanson. Bloch Simulator. (www.drcmr.dk/bloch)

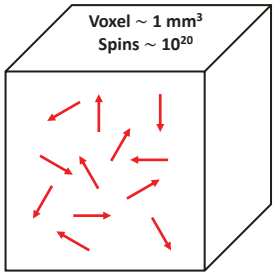


RMN - principe



$B_0 \sim 0$ (champ magnétique terrestre = 47 μT)

RMN - principe

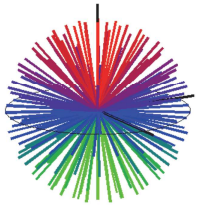


$\mathbf{B_0} \sim 0$ (champ magnétique terrestre = 47 µT)

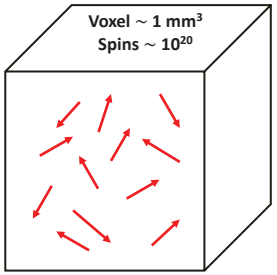
Agitation thermique >> effets magnétiques

$\mathbf{M} = \sum \boldsymbol{\mu}$

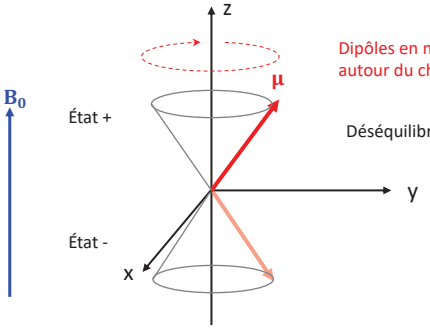
$\mathbf{M} = 0$



RMN - principe



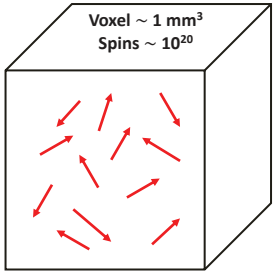
$\mathbf{B_0} > 0$



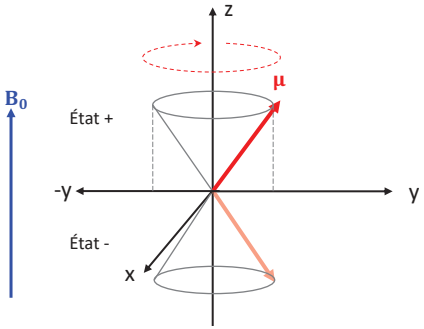
Dipôles en mouvement de précession autour du champ B_0

Déséquilibre des populations

RMN - principe

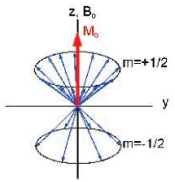


$\mathbf{B_0} > 0$



$\mathbf{M} = \sum \boldsymbol{\mu}$

$\mathbf{M} > 0$



Orientation quelconque des spins sur les cônes de précession: ils sont déphasés

RMN - principe

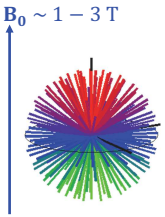
1. Préparation (aimantation)

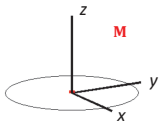
Précession de Larmor : $\omega_0 = \gamma B_0$

$\mathbf{B_0} \sim 1 - 3\ \mathrm{T}$

$\mathbf{M} = \sum \boldsymbol{\mu}$

$\mathbf{M} > 0$





Mouvement de précession se fait à la fréquence de Larmor

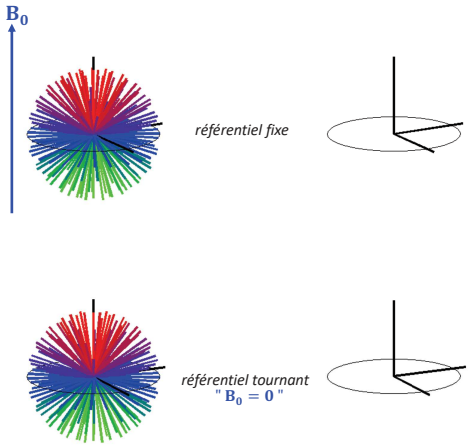
$$\nu = \frac{\omega}{2\pi}$$

Nota: la fréquence représente le nombre de tours par seconde

RMN - principe

1. Préparation (aimantation)

Précession de Larmor : $\omega_0 = \gamma B_0$



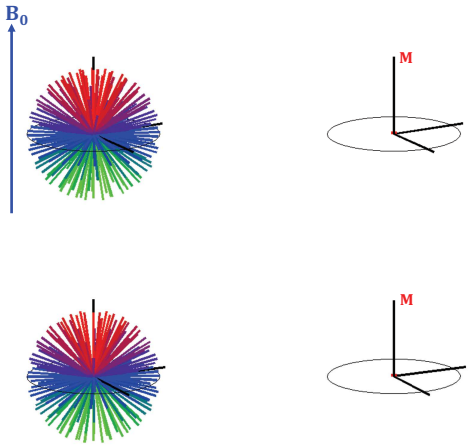
RMN - principe

1. Préparation (aimantation)

Précession de Larmor : $\omega_0 = \gamma B_0$

Alignement sur le champ
- **Aimantation longitudinale qcq M_z**
- **Aimantation longitudinale max M_L**

Equilibre entre agitation thermique et alignement sur le champ

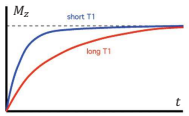


RMN - principe

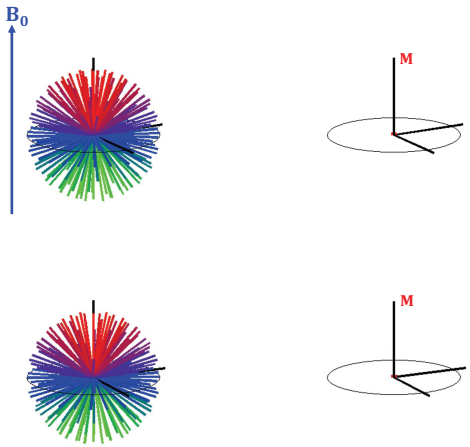
1. Préparation (aimantation)

Précession de Larmor : $\omega_0 = \gamma B_0$

Alignement sur le champ
- **Aimantation longitudinale qcq M_z**
- **Aimantation longitudinale max M_L**
- **Cinétique exponentielle T_1**



$$M_z = M_L\left(1 - e^{-t/T_1}\right)$$

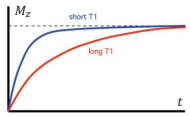


RMN - principe

1. Préparation (aimantation)

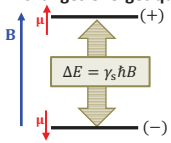
Précession de Larmor : $\omega_0 = \gamma B_0$

Alignement sur le champ
- **Aimantation longitudinale qcq M_z**
- **Aimantation longitudinale max M_L**
- **Cinétique exponentielle T_1**

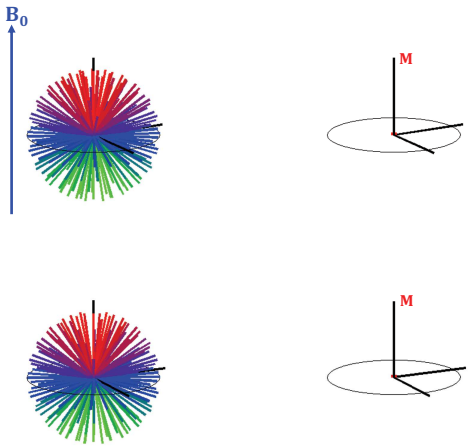


$$M_z = M_L\left(1 - e^{-t/T_1}\right)$$

- **Echanges énergétiques :**



$N_+ > N_-$



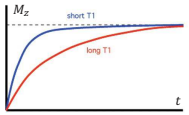
RMN - principe

1. Préparation (aimantation)

Précession de Larmor : $\omega_0 = \gamma B_0$

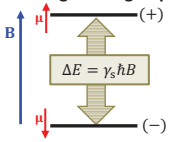
Alignement sur le champ

- **Aimantation longitudinale qcq M_z**
- **Aimantation longitudinale max M_L**
- **Cinétique exponentielle T_1**

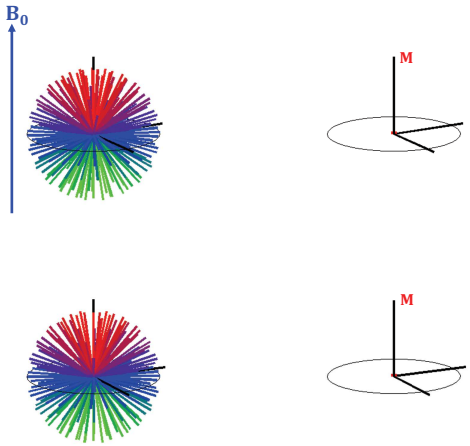


$$M_z = M_L\left(1 - e^{-t/T_1}\right)$$

- **Echanges énergétiques :** $E = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}$



$N_+ > N_-$

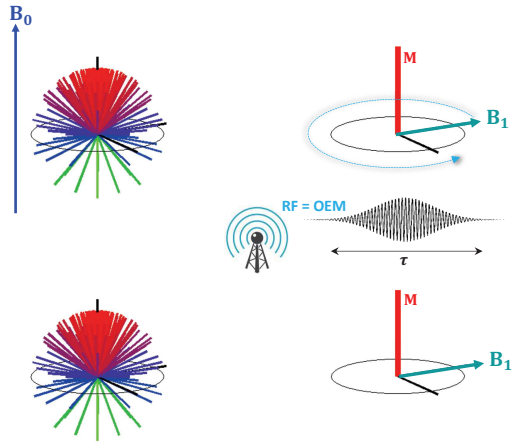


RMN - principe

2. Perturbation (résonance)

Application d'une OEM = champ magnétique tournant B_1

- **de** fréquence , à la résonance, $\omega_r = \omega_0/2\pi$
- **pendant une durée** τ (~ms) = impulsion

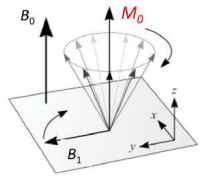


RMN - principe

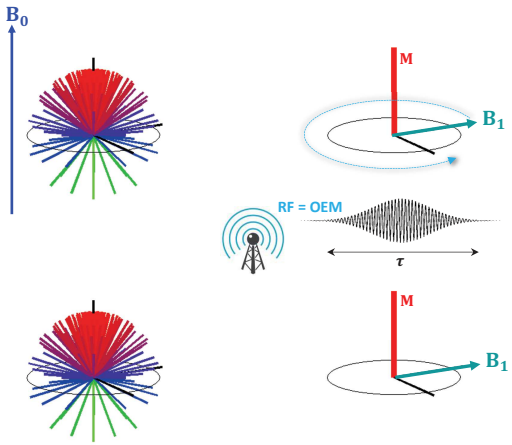
2. Perturbation (résonance)

Application d'un champ tournant B_1

- **de** fréquence , à la résonance, $\omega_r = \omega_0/2\pi$
- **pendant une durée** τ (~ms) = impulsion



Dans le référentiel tournant associé à l'aimantation **M** (**M_0**), tout se passe comme si on appliquait un champ magnétique constant **B_1** sur un des axes du plan transverse (ici *y*) pendant un temps τ



Cours Bases de la RMN. École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris

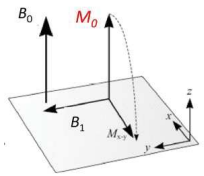
RMN - principe

2. Perturbation (résonance)

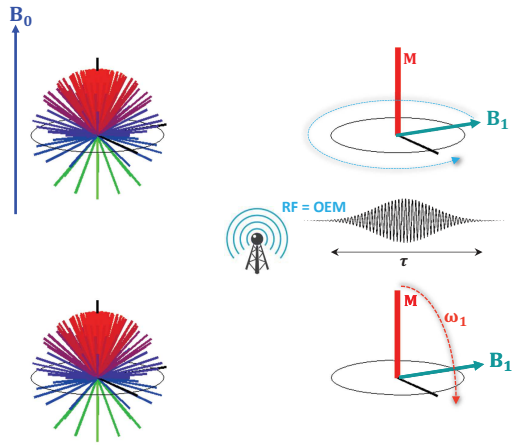
Application d'un champ tournant B_1

- **de** fréquence , à la résonance, $\omega_r = \omega_0/2\pi$
- **pendant une durée** τ (~ms) = impulsion
- **dans le plan horizontal**

Précession de M autour de B_1



Nota: la sortie d'équilibre du système de spins après l'application de **B_1** pendant τ peut se décrire en appliquant à l'aimantation **M** (ou **M_0**, et non pas aux spins) les règles de la mécanique classique.

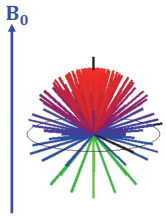


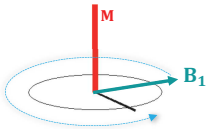
RMN - principe

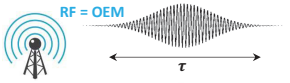
2. Perturbation (résonance)

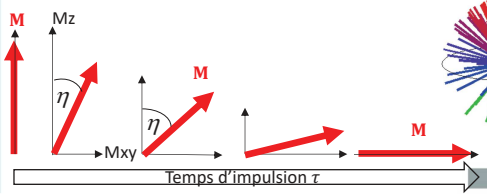
Application d'un champ tournant B_1
- **de** fréquence , à la résonance, $\omega_r = \omega_0/2\pi$
- **pendant une durée** τ (~ms) = impulsion
- **dans le plan horizontal**

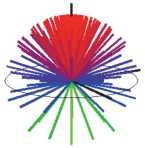
Précession de M autour de B_1
- **Nutation à** $\omega_1 = \gamma B_1$
- **Bascule d'un angle** $\eta = \tau\,\omega_1 = \tau\,\gamma B_1$

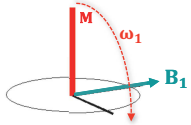










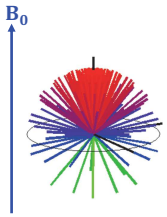


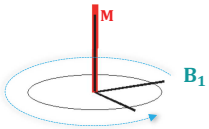
RMN - principe

2. Perturbation (résonance)

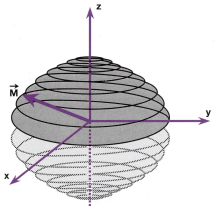
Application d'un champ tournant B_1
- **de** fréquence , à la résonance, $\omega_r = \omega_0/2\pi$
- **pendant une durée** τ (~ms) = impulsion
- **dans le plan horizontal**

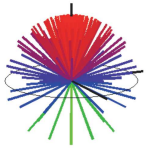
Précession de M autour de B_1
- **Nutation à** $\omega_1 = \gamma B_1$
- **Bascule d'un angle** $\eta = \tau\,\omega_1$

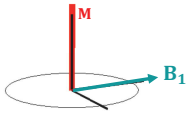




$$\eta = \frac{\pi}{2}$$







Mouvement réel complexe de double précession décrit par l'extrémité de **M**

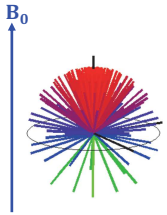
RMN - principe

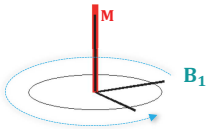
2. Perturbation (résonance)

Application d'un champ tournant B_1
- **de** fréquence , à la résonance, $\omega_r = \omega_0/2\pi$
- **pendant une durée** τ (~ms) = impulsion
- **dans le plan horizontal**

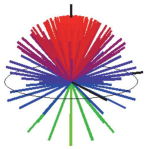
Précession de M autour de B_1
- **Nutation à** $\omega_1 = \gamma B_1$
- **Bascule d'un angle** $\eta = \tau\,\omega_1$

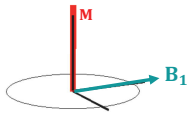
Disparition de M_z
Apparition de M_{xy} (aimantation transverse)





$$\eta = \frac{\pi}{2}$$



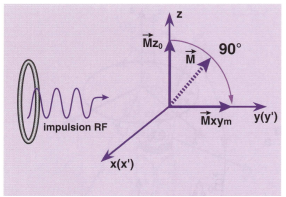


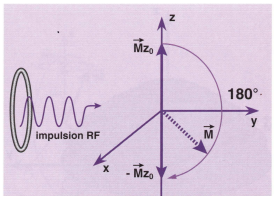
RMN - principe

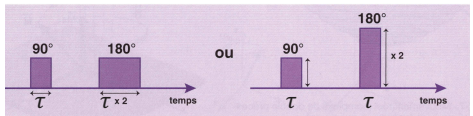
2. Perturbation (résonance)

Application d'un champ tournant B_1
- **de** fréquence , à la résonance, $\omega_r = \omega_0/2\pi$
- **pendant une durée** τ (~ms) = impulsion
- **dans le plan horizontal**

Précession de M autour de B_1
- **Nutation à** $\omega_1 = \gamma B_1$
- **Bascule d'un angle** $\eta = \tau\,\omega_1$







Comprendre l'IRM. 8ème édition. 2018. B. KASTLER, D. VETTER

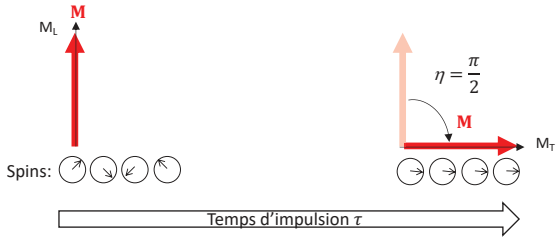
RMN - principe

2. Perturbation (résonance)

Application d'un champ tournant B_1

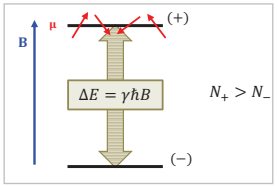
- **de** fréquence , à la résonance, $\omega_r = \omega_0/2\pi$
- **pendant une durée** τ (~ms) = impulsion
- **dans le plan horizontal**
- **Nutation de M autour de B_1**

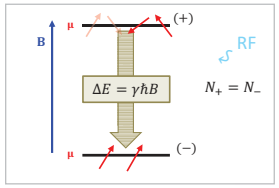
Du point de vue énergétique:



Spins déphasés: $\sum \mu_X = 0$

Spins en phase: $\sum \mu_X = M_T$

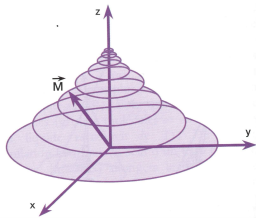


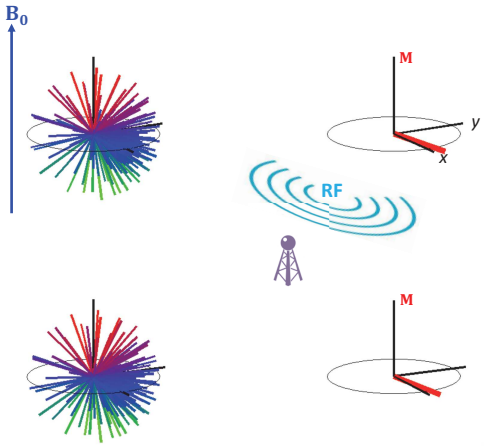


RMN - principe

3. Mesure

Arrêt de la stimulation RF B_1





Réduction de M_x ++ rapide que Repousse de M_z

Nota: **M** continue de précesser autour de B_0, l'extrémité de **M** décrit une **spirale** sur une surface en forme de « pavillon de trompette ».

Comprendre l'IRM. 8ème édition. 2018. B. KASTLER, D. VETTER

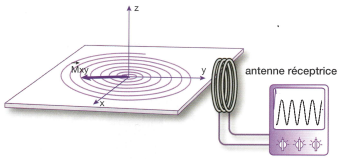
RMN - principe

3. Mesure

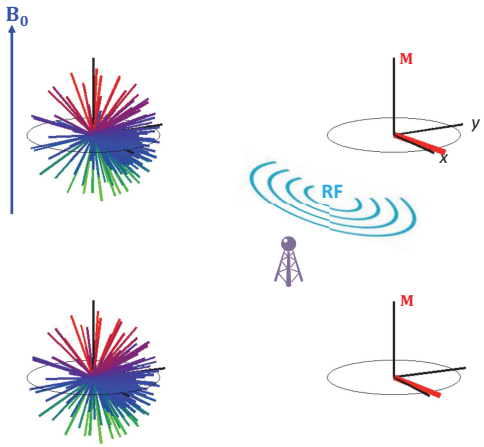
Arrêt de la stimulation RF B_1

or: $$\mathbf{B} = \mu_0\,\mathbf{H} + \frac{d\mathbf{M}}{dV}$$

La rotation de Mx dans le plan xOy (spirale) induit un champ magnétique ou onde de radiofréquence (RF).



Mouvement caractéristique du vecteur **M** (OEM) émis par le système de spins enregistré et transformé en signal électrique mesurable par une antenne = signal RMN.

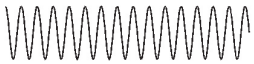


RMN - principe

3. Mesure (relaxation)

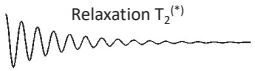
Arrêt de la stimulation RF B_1

Signal = M_x



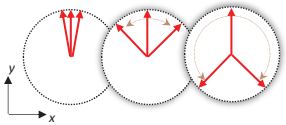
En fait:

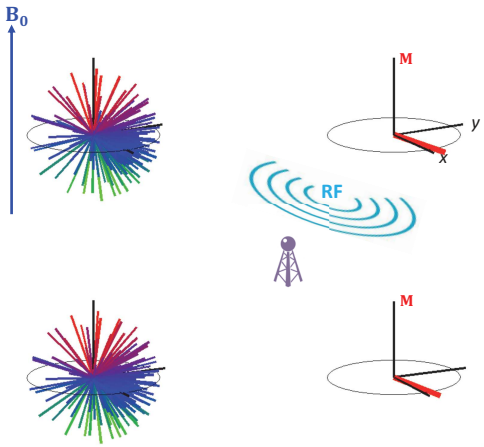
Signal = M_x



RELAXATION $T_2^{(*)}$

- **Déphasage progressif**



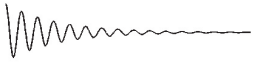


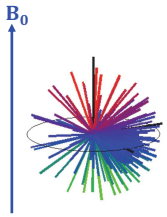
RMN - principe

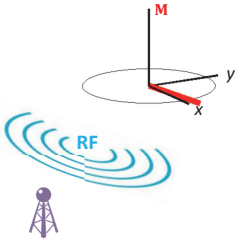
3. Mesure (relaxation)

Arrêt de la stimulation RF B_1

Signal = M_x

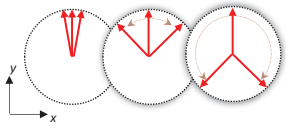


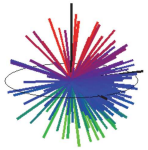


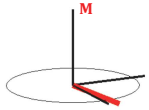


RELAXATION T_2

- Déphasage progressif
- Inhomogénéités de champ
- Phénomène entropique







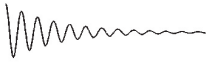
Micro-variations locales de B_0 provoquent des changements de vitesses de précession et *in fine* un déphasage des spins.

RMN - principe

3. Mesure (relaxation)

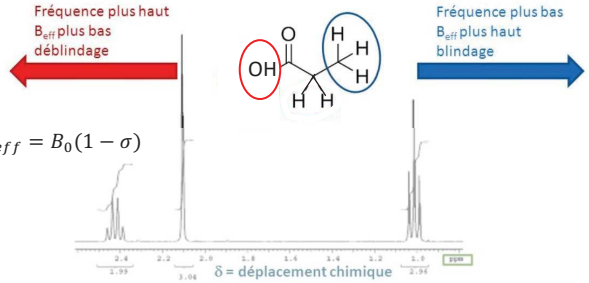
Arrêt de la stimulation RF B_1

Signal = M_x



RELAXATION T_2

- Déphasage progressif
- Inhomogénéités de champ
  - d'origine « moléculaire » $B_{eff} = B_0(1-\sigma)$
  - d'origine « instrumentale »

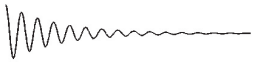


RMN - principe

3. Mesure (relaxation)

Arrêt de la stimulation RF B_1

Signal = M_x



RELAXATION T_2

- Déphasage progressif
- Inhomogénéités de champ
  - d'origine « moléculaire »
  - d'origine « instrumentale »

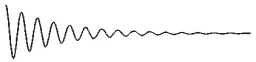
L'aimant IRM du centre de recherche NeuroSpin du CEA Saclay (Essonne) pèse 130 tonnes et produit un champ magnétique de 11,7 teslas.

RMN - principe

3. Mesure (relaxation)

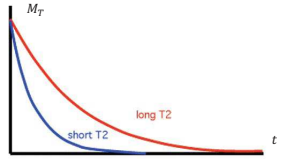
Arrêt de la stimulation RF B_1

Signal = M_x

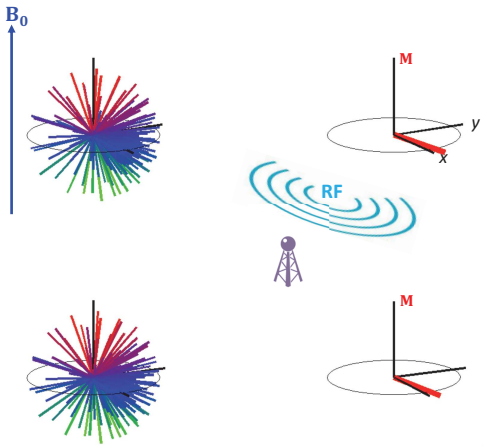


RELAXATION T_2

- Déphasage progressif
- Inhomogénéités de champ
  - d'origine « moléculaire »
  - d'origine « instrumentale »
- Phénomène entropique
- Cinétique T_2



$$M_{xy}(t) = M_T\, e^{-t/T_2}$$

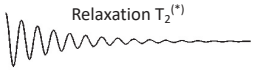


RMN - principe

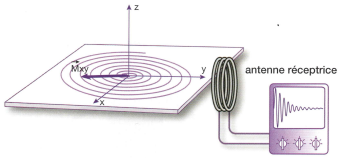
3. Mesure (relaxation)

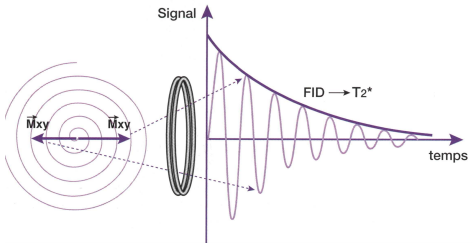
Arrêt de la stimulation RF B_1

Signal = M_x



Signal FID recueilli par une antenne placée dans xOy





Signal d'induction libre
Free Induction Decay FID

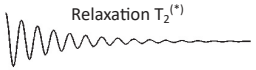
Comprendre l'IRM. 8ème édition. 2018. B. KASTLER, D. VETTER

RMN - principe

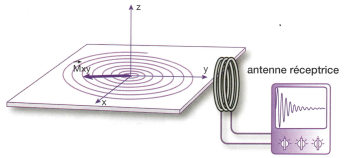
3. Mesure (relaxation)

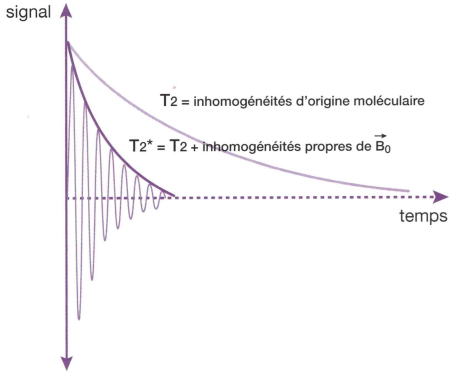
Arrêt de la stimulation RF B_1

Signal = M_x



Signal FID recueilli par une antenne placée dans xOy





Nota: selon Oz, B_0 intense rend indétectables les faibles variations de champ magnétique (repousse de Mz).

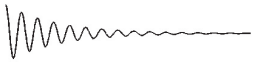
Comprendre l'IRM. 8ème édition. 2018. B. KASTLER, D. VETTER

RMN - principe

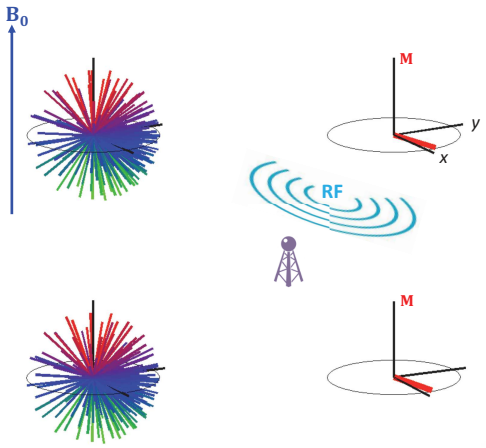
3. Mesure (relaxation)

Arrêt de la stimulation RF B_1

Signal = M_x



RELAXATION **T_2: Disparition de M_{xy}**
RELAXATION **T_1: Repousse de M_z**

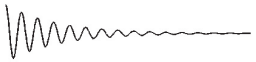


RMN - principe

3. Mesure (relaxation)

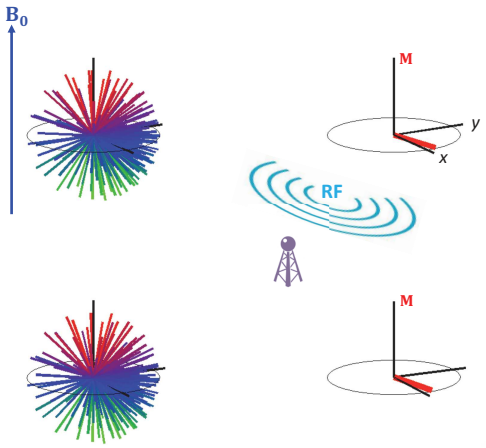
Arrêt de la stimulation RF B_1

Signal = M_x



RELAXATION **T_2: Disparition de M_{xy}**
RELAXATION **T_1: Repousse de M_z**

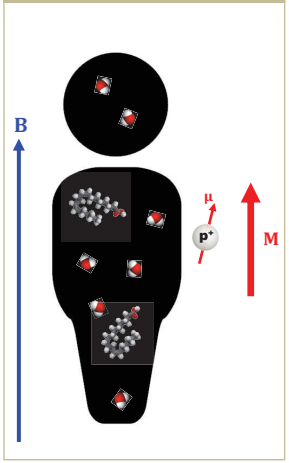
Dans les tissus biologiques : $T_1 \sim 10\ T_2$



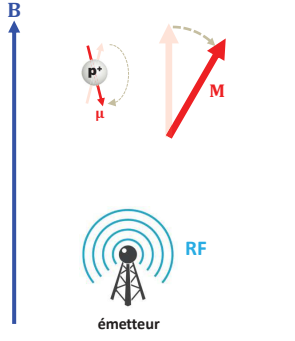
RMN - séquence

Une séquence en 3 étapes:

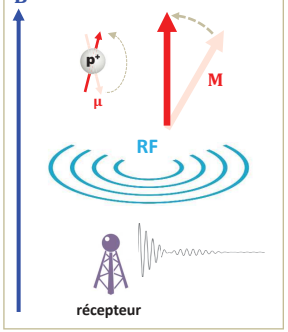
1. Préparation (aimantation)



2. Perturbation (résonance)



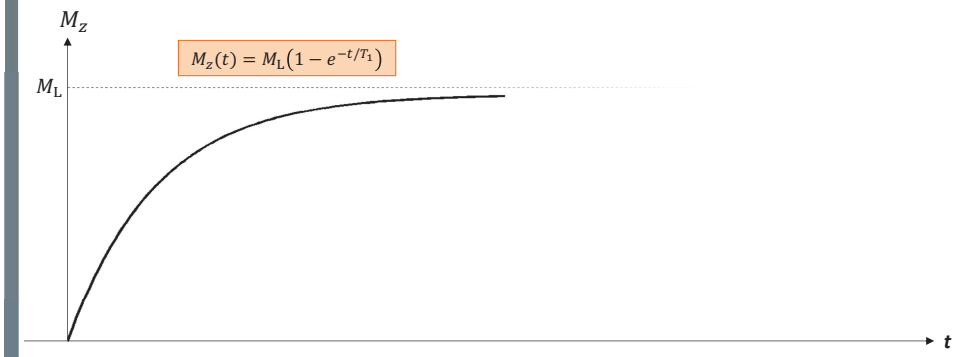
3. Mesure (relaxation)



RMN - séquence

Préparation

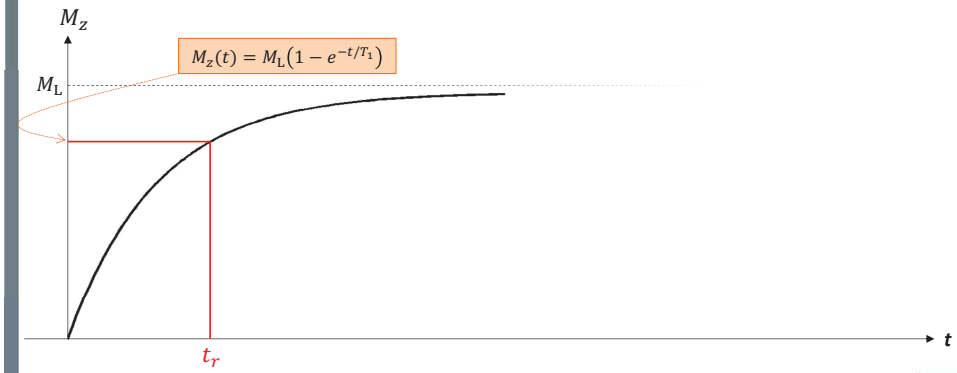
Aimantation longitudinale dans B_0
Relaxation T_1



RMN - séquence

Préparation

Aimantation longitudinale dans B_0
Relaxation T_1
Durant un temps t_r (temps de répétition)

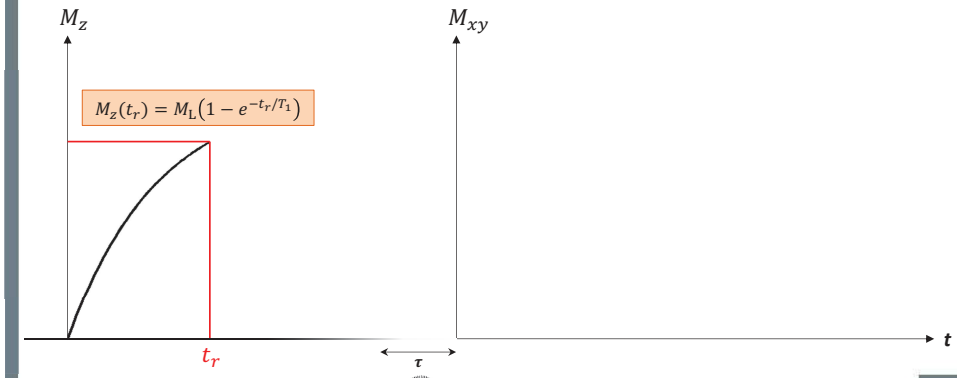


RMN - séquence

Préparation

RF

Stimulation RF durant un temps τ
Bascule de l'aimantation d'un angle η
Apparition d'une aimantation transverse

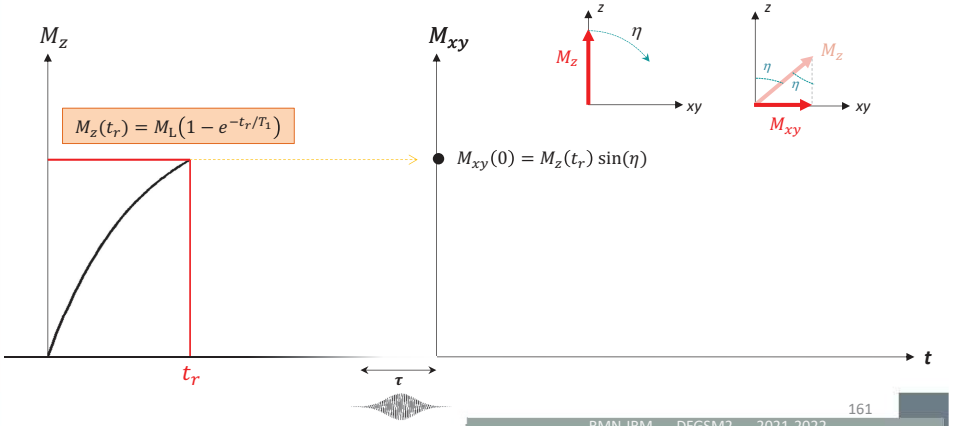


RMN - séquence

Préparation | RF

Stimulation RF durant un temps τ
Bascule de l'aimantation d'un angle η
Apparition d'une aimantation transverse

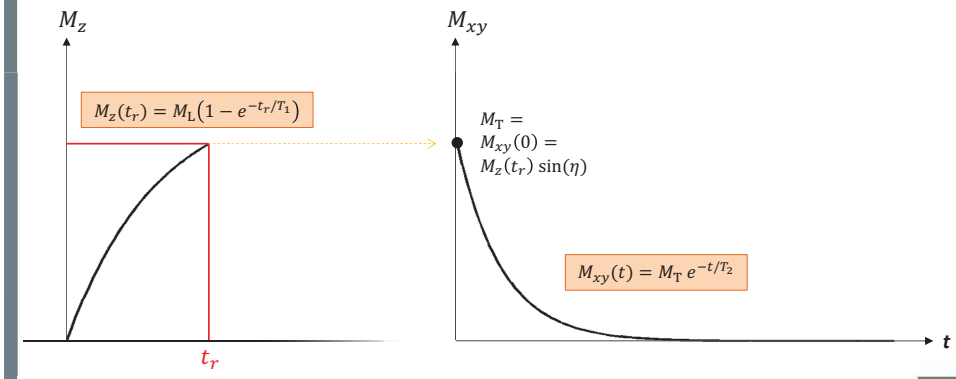
nota: $\sin\frac{\pi}{2} = 1$



RMN - séquence

Préparation | RF | Mesure

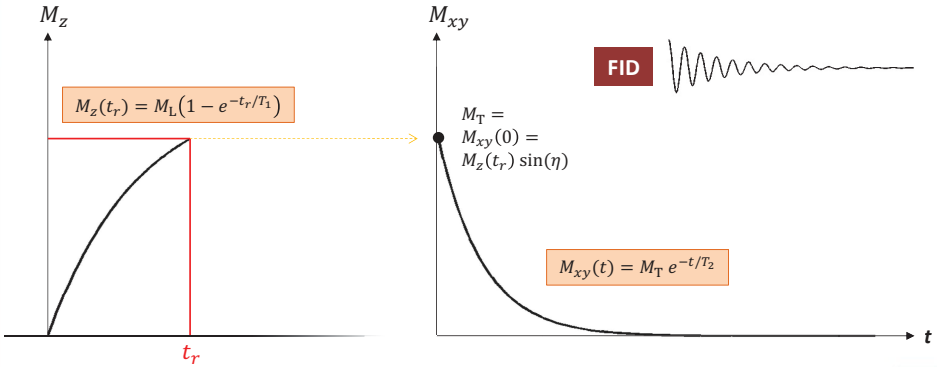
Retour à l'équilibre
Relaxation T_2



RMN - séquence

Préparation | RF | Mesure

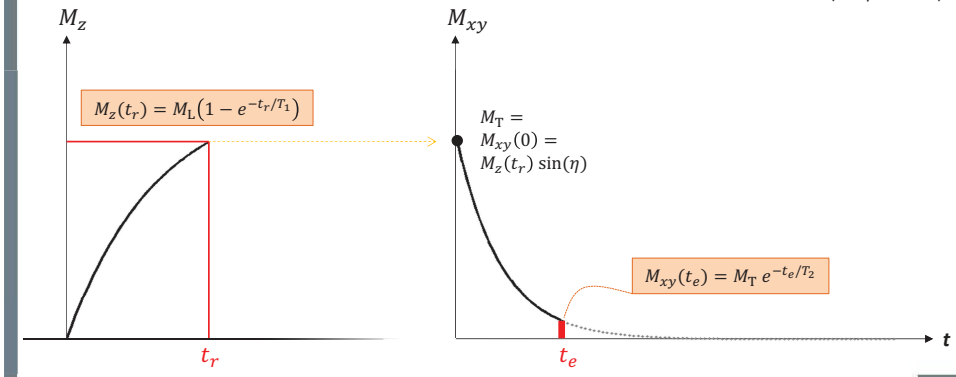
Retour à l'équilibre
Relaxation T_2
Recueil du signal **(FID)**



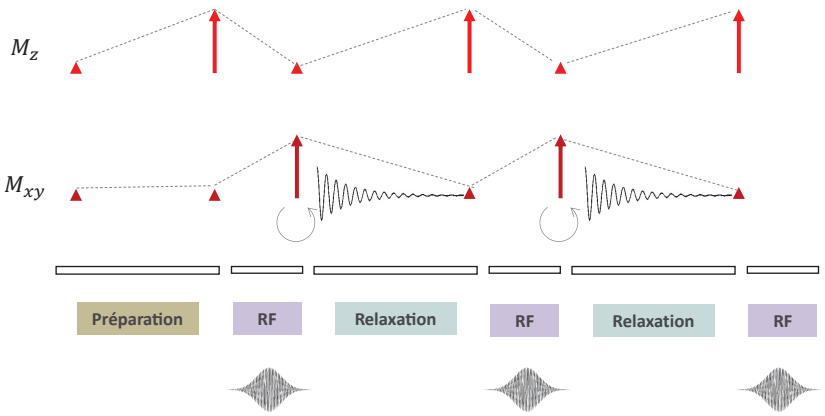
RMN - séquence

Préparation | RF | Mesure

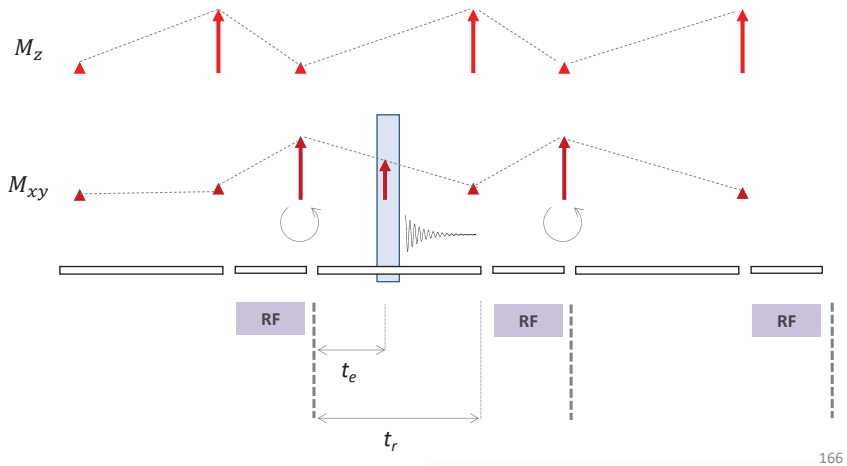
Retour à l'équilibre
Relaxation T_2
Recueil du signal **(FID)** au temps t_e
(temps d'écho)



RMN – séquence: synthèse



RMN – séquence: synthèse



RMN – contraste

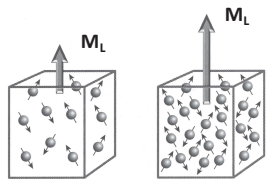
Déterminants du signal :

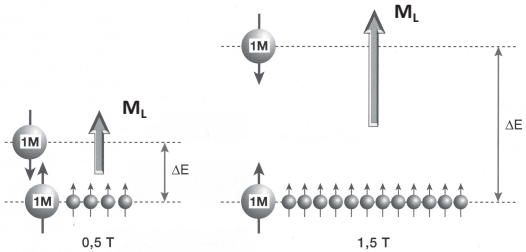
$$M_L = \sum \mu_z \quad \begin{cases} \propto \boldsymbol{\mu} \propto \gamma & \textit{intrinsèque} \\ & \\ & \end{cases}$$

RMN – contraste

Déterminants du signal :

$$M_L = \sum \mu_z \quad \begin{cases} \propto \boldsymbol{\mu} \propto \gamma & \textit{intrinsèque} \\ \propto \rho(\,^1\mathrm{H}) & \textit{intrinsèque} \\ \propto \dfrac{\Delta N}{N} \propto \dfrac{B_0}{T} & \textit{extrinsèque} \end{cases}$$





Comprendre l'IRM. 8ème édition. 2018. B. KASTLEr, D. VETTER

RMN – contraste

Déterminants du signal :

$$M_L = \sum \mu_z \quad \begin{cases} \propto \boldsymbol{\mu} \propto \gamma & \textit{intrinsèque} \\ \propto \rho(\,^1\mathrm{H}) & \textit{intrinsèque} \\ \propto \dfrac{\Delta N}{N} \propto \dfrac{B_0}{T} & \textit{extrinsèque} \end{cases}$$

T_1, T_2 *intrinsèque*

RMN – contraste

Déterminants du signal :

$$M_L = \sum \mu_z \quad \begin{cases} \propto \boldsymbol{\mu} \propto \gamma & \textit{intrinsèque} \\ \propto \rho(\,^1\mathrm{H}) & \textit{intrinsèque} \\ \propto \dfrac{\Delta N}{N} \propto \dfrac{B_0}{T} & \textit{extrinsèque} \end{cases}$$

T_1, T_2 *intrinsèque*

t_r, t_e, η *extrinsèque*

RMN – contraste

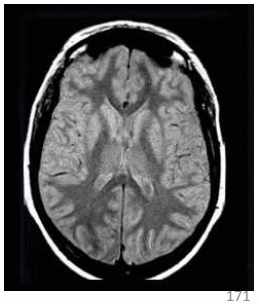
Déterminants du signal :

$$M_L = \sum \mu_z \quad \begin{cases} \propto \boldsymbol{\mu} \propto \gamma & \textit{intrinsèque} \\ \propto \rho(\,^1\mathrm{H}) & \textit{intrinsèque} \\ \propto \dfrac{\Delta N}{N} \propto \dfrac{B_0}{T} & \textit{extrinsèque} \end{cases}$$

T_1, T_2 *intrinsèque*

t_r, t_e, η *extrinsèque*

Densité de protons ρ :
Degré d'hydratation / lipidation



RMN – contraste

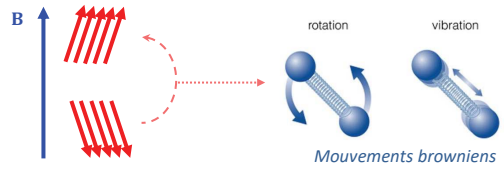
Déterminants du signal :

$$M_L = \sum \mu_z \quad \begin{cases} \propto \boldsymbol{\mu} \propto \gamma & \textit{intrinsèque} \\ \propto \rho(\,^1\mathrm{H}) & \textit{intrinsèque} \\ \propto \dfrac{\Delta N}{N} \propto \dfrac{B_0}{T} & \textit{extrinsèque} \end{cases}$$

T_1, T_2 *intrinsèque*

t_r, t_e, η *extrinsèque*

Relaxation T_1 : échanges énergétiques avec le réseau*



*A ses débuts la RMN a été utilisée pour étudier des molécules dans un réseau cristallin; par la suite réseau = milieu moléculaire environnant.

RMN – contraste

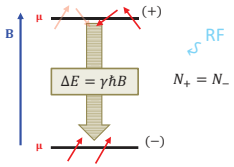
Déterminants du signal :

$$M_L = \sum \mu_z \begin{cases} \propto \boldsymbol{\mu} \propto \gamma & \textit{intrinsèque} \\ \propto \rho(\,^1\mathrm{H}) & \textit{intrinsèque} \\ \propto \dfrac{\Delta N}{N} \propto \dfrac{B_0}{T} & \textit{extrinsèque} \end{cases}$$

T_1, T_2 *intrinsèque*

t_r, t_e, η *extrinsèque*

Relaxation T_1 : échanges énergétiques avec le réseau



RMN – contraste

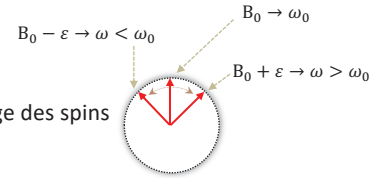
Déterminants du signal :

$$M_L = \sum \mu_z \begin{cases} \propto \boldsymbol{\mu} \propto \gamma & \textit{intrinsèque} \\ \propto \rho(\,^1\mathrm{H}) & \textit{intrinsèque} \\ \propto \dfrac{\Delta N}{N} \propto \dfrac{B_0}{T} & \textit{extrinsèque} \end{cases}$$

T_1, T_2 *intrinsèque*

t_r, t_e, η *extrinsèque*

Relaxation T_2 : déphasage des spins



- Inhomogénéités technologiques de champ B_0 (T_2^*)
- Fluctuations locales dues à l'environnement chimique (T_2)

RMN – contraste

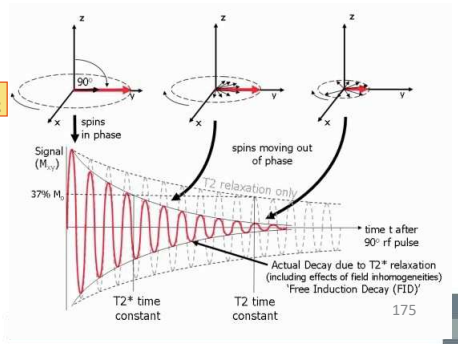
Déterminants du signal :

$$M_L = \sum \mu_z \begin{cases} \propto \boldsymbol{\mu} \propto \gamma & \textit{intrinsèque} \\ \propto \rho(\,^1\mathrm{H}) & \textit{intrinsèque} \\ \propto \dfrac{\Delta N}{N} \propto \dfrac{B_0}{T} & \textit{extrinsèque} \end{cases}$$

T_1, T_2 *intrinsèque*

t_r, t_e, η *extrinsèque*

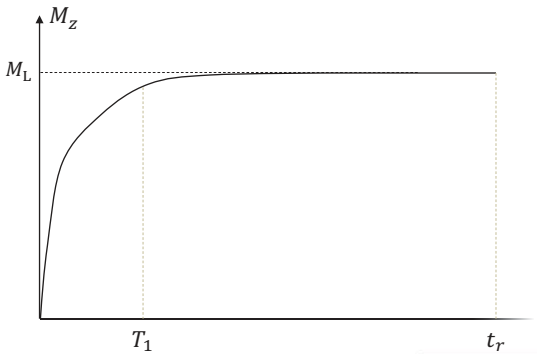
Relaxation T_2



RMN – contraste

Pondération ρ (densité de protons)

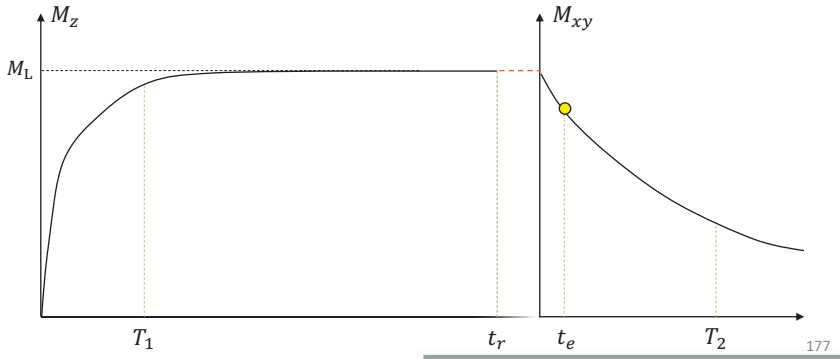
$t_r \gg T_1$
$t_e \ll T_2$



RMN – contraste

Pondération ρ (densité de protons)

$t_r \gg T_1$
$t_e \ll T_2$

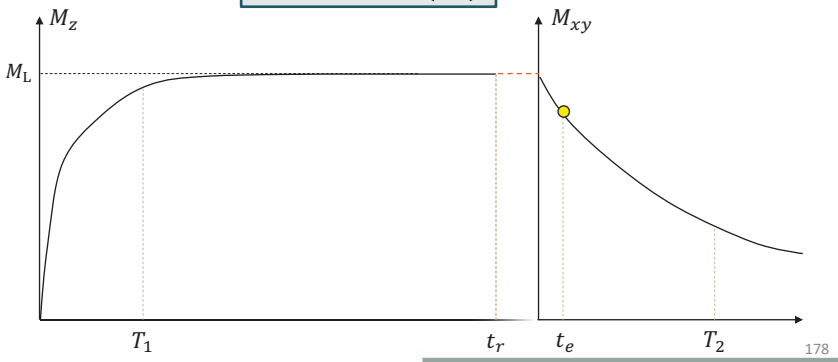


RMN – contraste

Pondération ρ (densité de protons)

$t_r \gg T_1$
$t_e \ll T_2$

Signal $\propto M_L \propto \rho(^1\mathrm{H})$

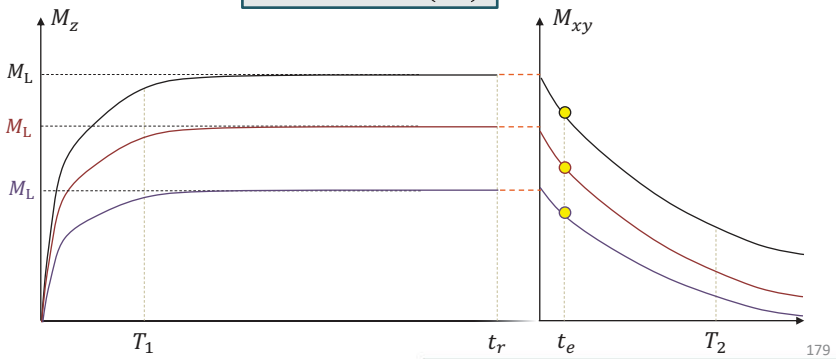


RMN – contraste

Pondération ρ (densité de protons)

$t_r \gg T_1$
$t_e \ll T_2$

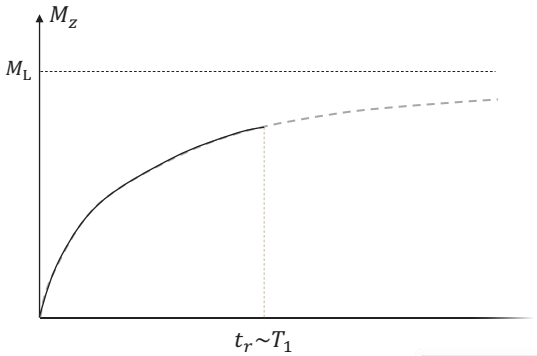
Signal $\propto M_L \propto \rho(^1\mathrm{H})$



RMN – contraste

Pondération T_1

$t_r \sim T_1$
$t_e \ll T_2$

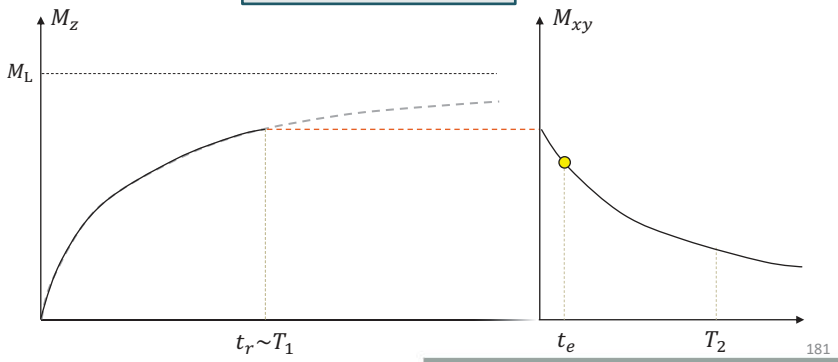


RMN – contraste

Pondération T_1

$t_r \sim T_1$
$t_e \ll T_2$

Signal $\propto M_L(1 - e^{-t_r/T_1})$

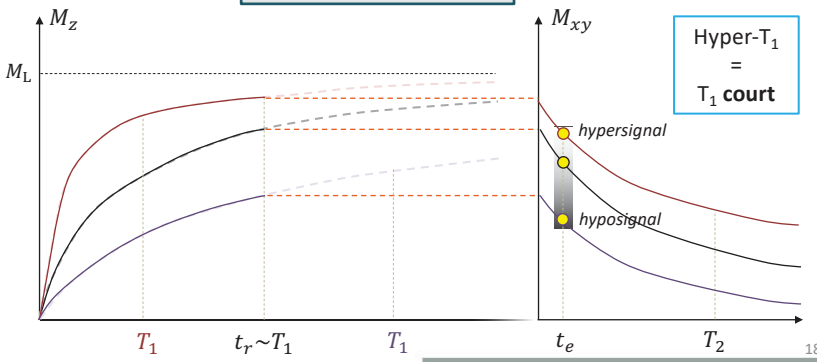


RMN – contraste

Pondération T_1

$t_r \sim T_1$
$t_e \ll T_2$

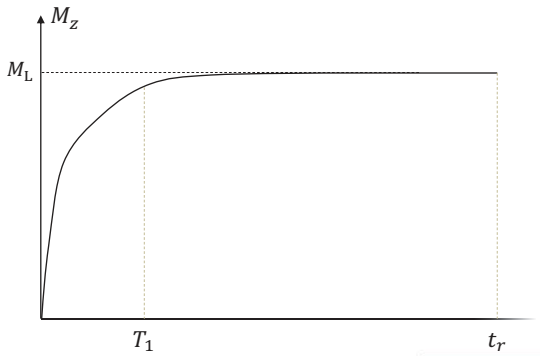
Signal $\propto M_L(1 - e^{-t_r/T_1})$



RMN – contraste

Pondération T_2

$t_r \gg T_1$
$t_e \sim T_2$

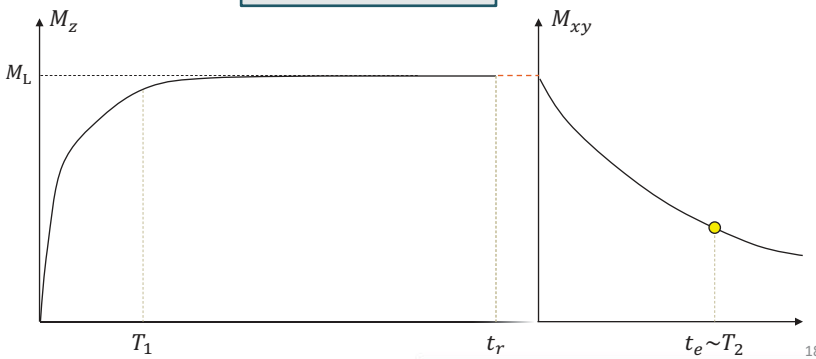


RMN – contraste

Pondération T_2

$t_r \gg T_1$
$t_e \sim T_2$

Signal $\propto M_L(\, e^{-t_e/T_2})$

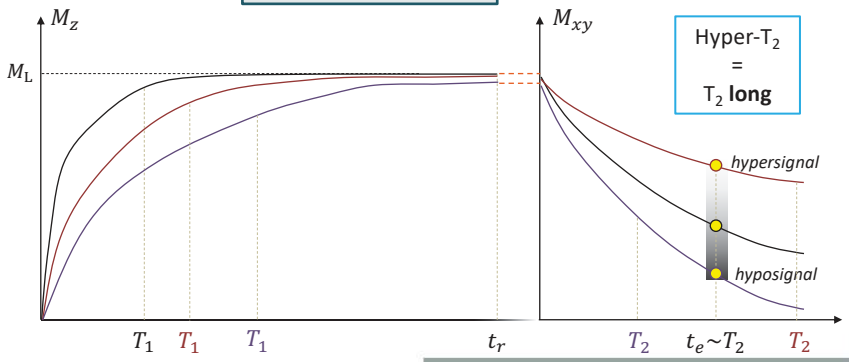


RMN – contraste

Pondération T_2

$t_r \gg T_1$
$t_e \sim T_2$

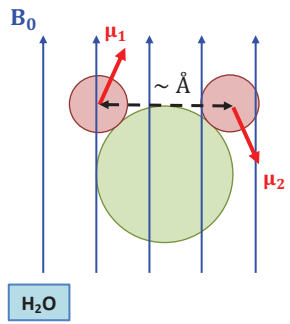
Signal $\propto M_L(\, e^{-t_e/T_2})$



RMN – contraste

Relaxation

- **Couplage dipolaire:** interaction magnétique dipôle-dipôle



$j(^{16}_{8}O) = 0$

$j(^{1}_{1}H) = 1/2$

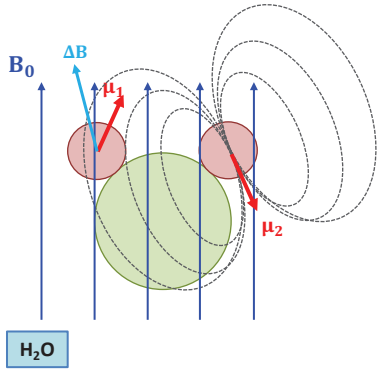
μ_1 perçoit B_0 et sa perturbation par μ_2

Couplage entre μ_1 et μ_2

RMN – contraste

Relaxation

- **Couplage dipolaire:** interaction magnétique dipôle-dipôle



État initial du système

μ_1 perçoit B_0 et sa perturbation par μ_2

$B_0 \sim 1 - 3T$

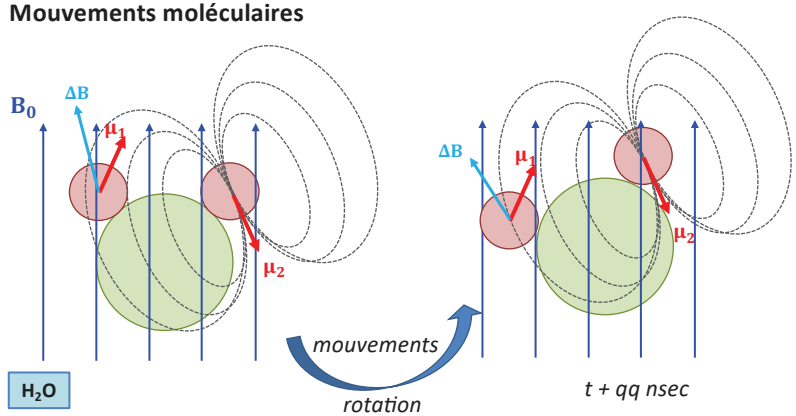
$\Delta B_0 \sim 10^{-3} - 10^{-4}\ T$

μ_1 ressent $\mathbf{B_0} + \mathbf{\Delta B}$

RMN – contraste

Relaxation

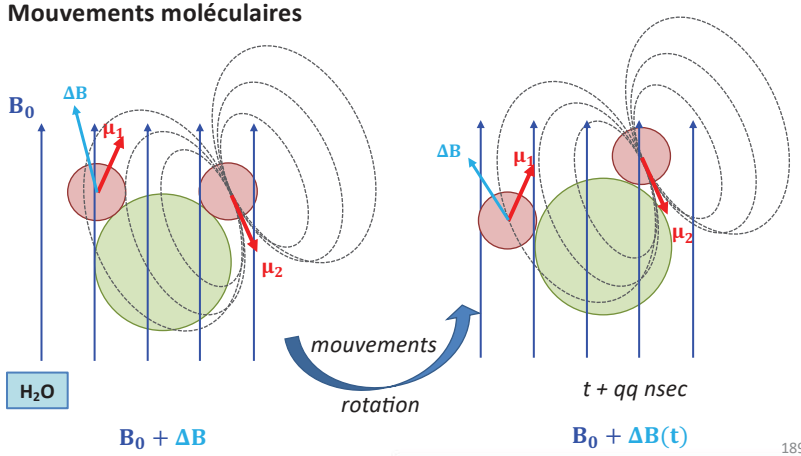
- **Couplage dipolaire:** interaction magnétique dipôle-dipôle
- **Mouvements moléculaires**



RMN – contraste

Relaxation

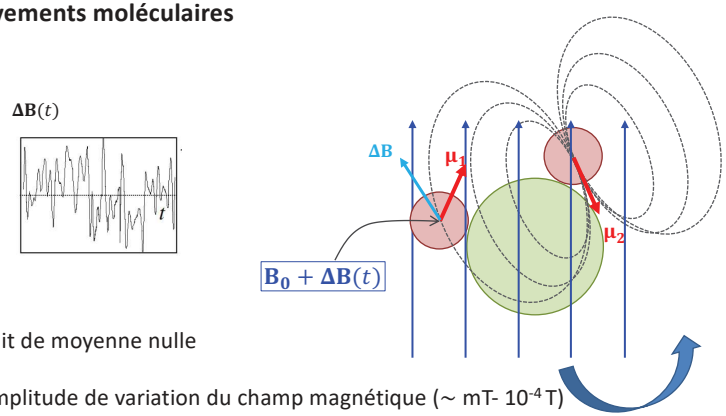
- **Couplage dipolaire:** interaction magnétique dipôle-dipôle
- **Mouvements moléculaires**



RMN – contraste

Relaxation

- **Couplage dipolaire:** interaction magnétique dipôle-dipôle
- **Mouvements moléculaires**



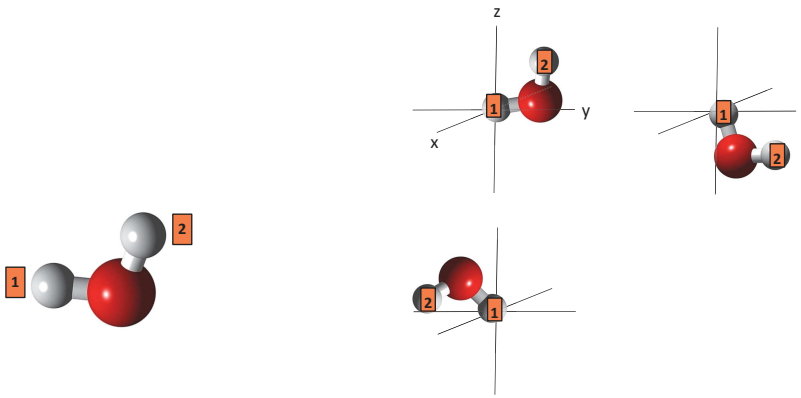
ΔB: bruit de moyenne nulle

ΔB^2: amplitude de variation du champ magnétique (~ mT- 10^{-4} T)

RMN – contraste

Relaxation

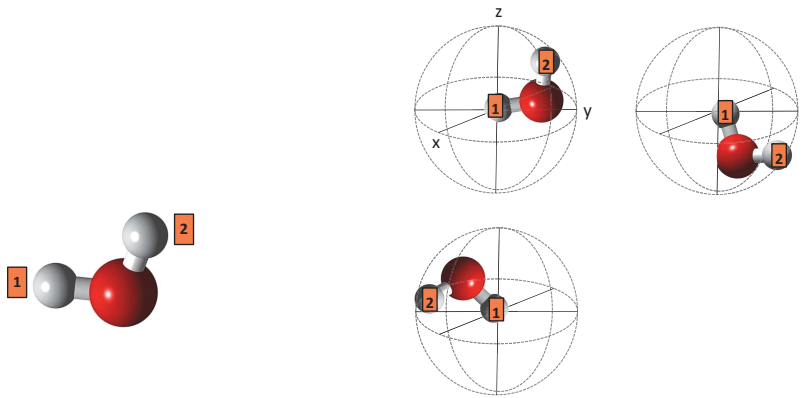
- **Couplage dipolaire**
- **Mouvements moléculaires**



RMN – contraste

Relaxation

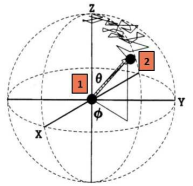
- **Couplage dipolaire**
- **Mouvements moléculaires**

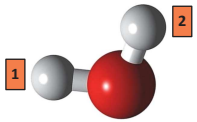


RMN – contraste

Relaxation

- Couplage dipolaire
- Mouvements moléculaires

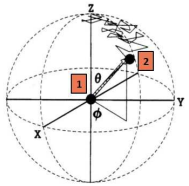


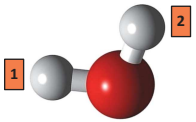


RMN – contraste

Relaxation

- Couplage dipolaire
- Mouvements moléculaires

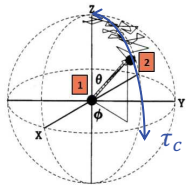


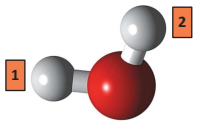


RMN – contraste

Relaxation

- Couplage dipolaire
- Mouvements moléculaires



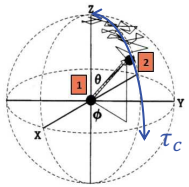


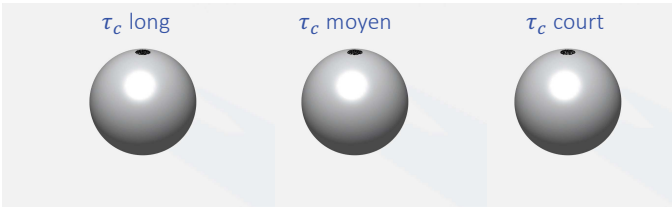
Temps d'autocorrélation τ_c

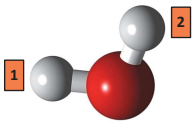
RMN – contraste

Relaxation

- Couplage dipolaire
- Mouvements moléculaires





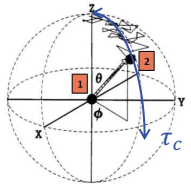


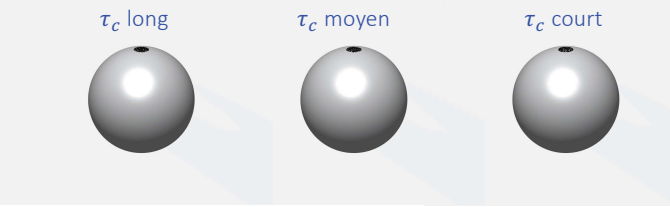
Temps d'autocorrélation τ_c

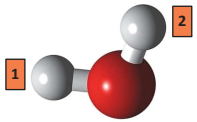
RMN – contraste

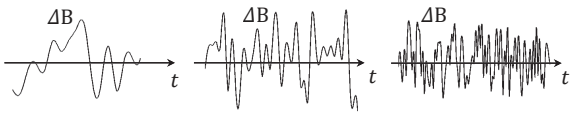
Relaxation

- **Couplage dipolaire**
- **Mouvements moléculaires**





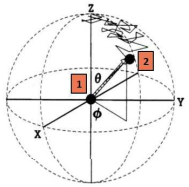


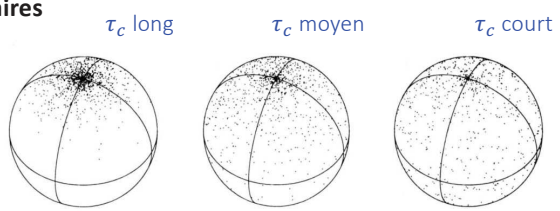


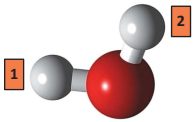
RMN – contraste

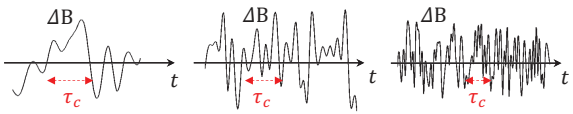
Relaxation

- **Couplage dipolaire**
- **Mouvements moléculaires**





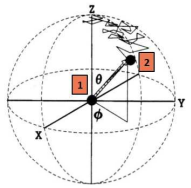


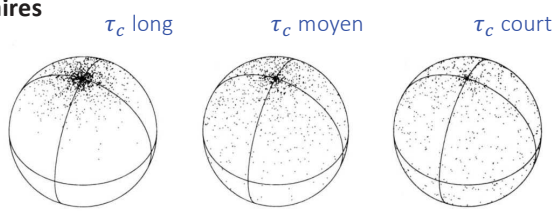


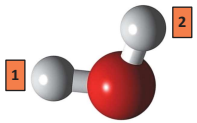
RMN – contraste

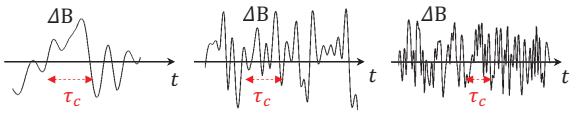
Relaxation

- **Couplage dipolaire**
- **Mouvements moléculaires**









$$\tau_c \propto \frac{V\eta}{kT}$$

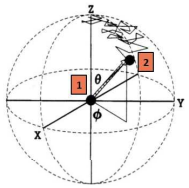
V Volume moléculaire

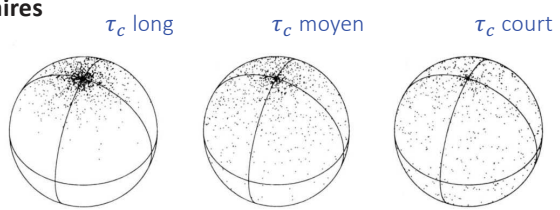
η viscosité

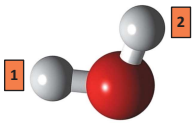
RMN – contraste

Relaxation

- **Couplage dipolaire**
- **Mouvements moléculaires**



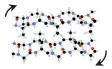




Temps d'autocorrélation τ_c

Eau libre : mouvement rapide : τ_C court

Eau liée / lipides : τ_C moyen

Macromolécules : mouvement lent : τ_C long 

RMN – contraste

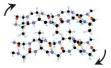
Relaxation

- Echanges énergétiques avec le réseau
- Déphasage des spins
- Relaxation liée à τ_c
- MW → rayon molécule → volume molécule → τ_c
- Plus la molécule est petite, plus elle tourne vite

Temps d'autocorrélation τ_c

Eau libre : mouvement rapide : τ_C court

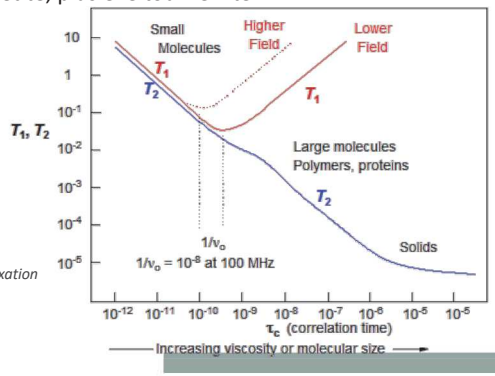
Eau liée / lipides : τ_C moyen

Macromolécules : mouvement lent : τ_C long 

RMN – contraste

Relaxation

- Echanges énergétiques avec le réseau
- Déphasage des spins
- Relaxation liée à τ_c
- MW → rayon molécule → volume molécule → τ_c
- Plus la molécule est petite, plus elle tourne vite

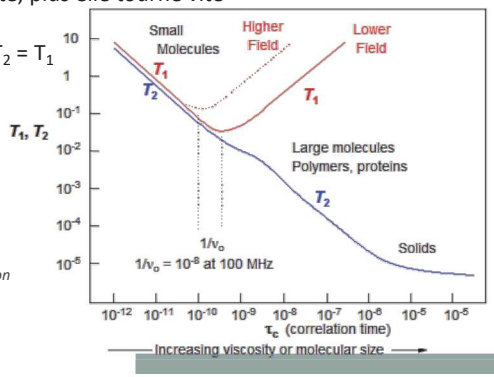


Bloembergen, E.M. Purcell, R.V. Pound "Relaxation Effects in Nuclear Magnetic Resonance Absorption" Physical Review ***1948***

RMN – contraste

Relaxation

- Echanges énergétiques avec le réseau
- Déphasage des spins
- Relaxation liée à τ_c
- MW → rayon molécule → volume molécule → τ_c
- Plus la molécule est petite, plus elle tourne vite
- $T_2 \leq T_1$
- Très petites molecules: $T_2 = T_1$
- Macromolécules: $T_2 < T_1$

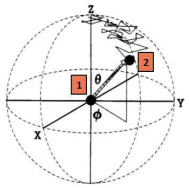


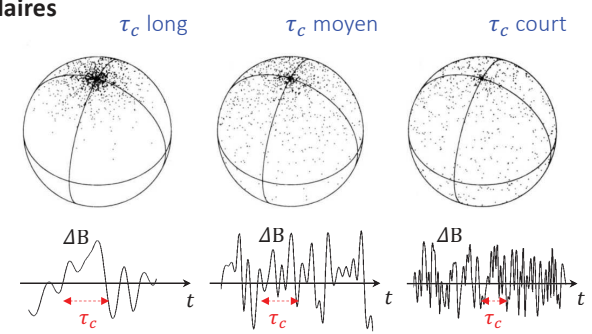
Bloembergen, E.M. Purcell, R.V. Pound "Relaxation Effects in Nuclear Magnetic Resonance Absorption" Physical Review ***1948***

RMN – contraste

Relaxation

- **Couplage dipolaire**
- **Mouvements moléculaires**





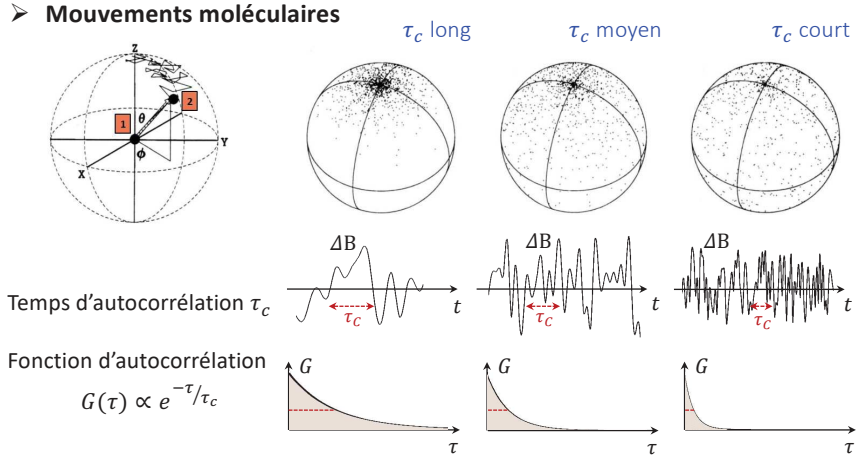
Temps d'autocorrélation τ_c

Macromolécules Structures osseuses Eau congelée	Eau liée/lipides	Eau libre
$\tau_c \gg {}^1/_{\nu_0}$	$\tau_c \sim {}^1/_{\nu_0}$	$\tau_c \ll {}^1/_{\nu_0}$

RMN – contraste

Relaxation

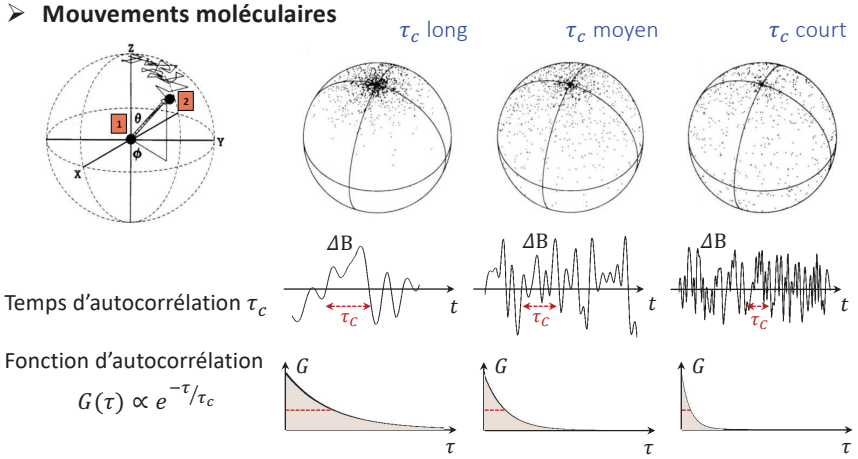
- **Couplage dipolaire**
- **Mouvements moléculaires**



RMN – contraste

Relaxation

- **Couplage dipolaire**
- **Mouvements moléculaires**

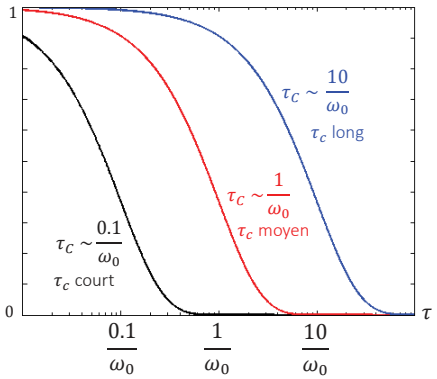


RMN – contraste

Relaxation

Fonction d'autocorrélation $G(\tau)$ → $J(\omega)$: spectre de $G(\tau)$

$G(\tau) \propto e^{-\tau/\tau_c}$

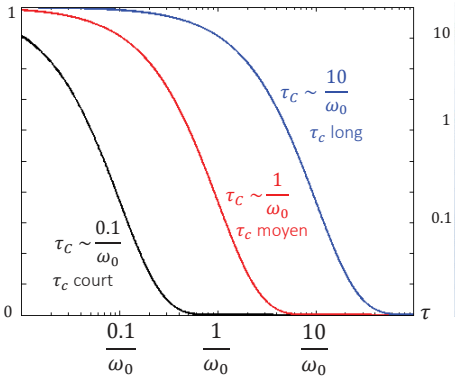


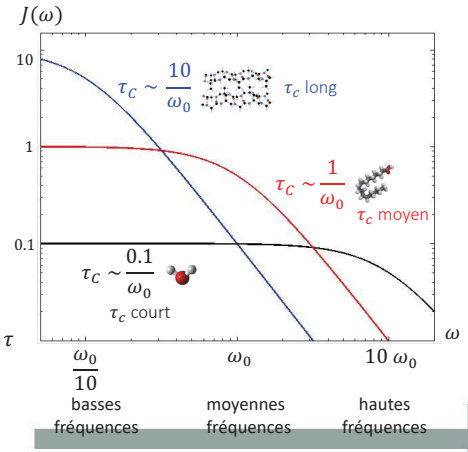
RMN – contraste

Relaxation

Fonction d'autocorrélation $G(\tau)$ → $J(\omega)$: spectre de $G(\tau)$

$G(\tau) \propto e^{-\tau/\tau_c}$





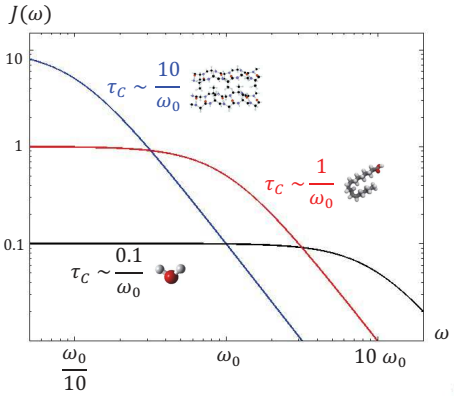
RMN – contraste

Relaxation

T_1

Fluctuations transverses → Échanges d'énergie

$$\frac{1}{T_1} = \gamma^2 \left(\langle \Delta B_x^2 \rangle + \langle \Delta B_y^2 \rangle\right) J(\omega_0)$$



RMN – contraste

Relaxation

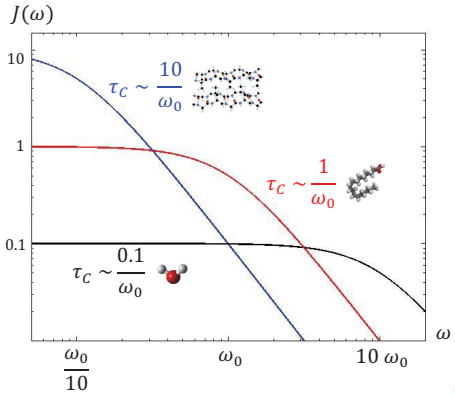
T_1

Fluctuations transverses → Échanges d'énergie

$$\frac{1}{T_1} = \gamma^2 \left(\langle \Delta B_x^2 \rangle + \langle \Delta B_y^2 \rangle\right) J(\omega_0)$$
$$= 2\gamma^2 \langle \Delta B^2 \rangle J(\omega_0)$$

Intensité du champ fluctuant

Proportion de fluctuation à la fréquence de Larmor



RMN – contraste

Relaxation

T_1

Fluctuations transverses → Échanges d'énergie

$$\frac{1}{T_1} = \gamma^2 \left(\langle \Delta B_x^2 \rangle + \langle \Delta B_y^2 \rangle\right) J(\omega_0)$$
$$= 2\gamma^2 \langle \Delta B^2 \rangle J(\omega_0)$$

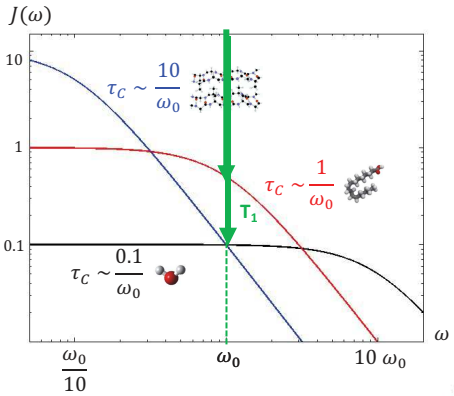
Intensité du champ fluctuant

Proportion de fluctuation à la fréquence de Larmor

1. $+\Delta B^2 \uparrow \quad + T_1 \downarrow$
2. $+ J(\omega_0) \downarrow \quad + T_1 \uparrow$

Lipides: $J(\omega_0) \uparrow$, T_1 court, hyper-T_1

Eau, os: $J(\omega_0) \downarrow$, T_1 long, hypo-T_1



RMN – contraste

Relaxation

T_1

Fluctuations transverses → Échanges d'énergie

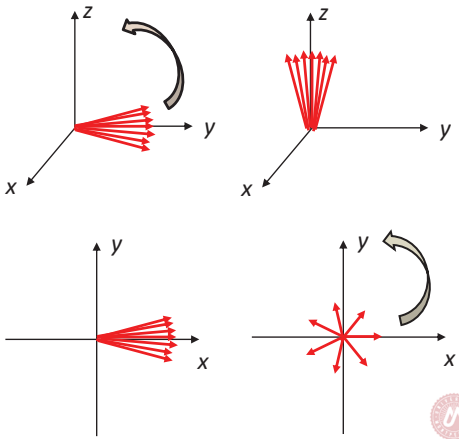
$$\frac{1}{T_1} = \gamma^2 \left(\langle \Delta B_x^2 \rangle + \langle \Delta B_y^2 \rangle\right) J(\omega_0)$$
$$= 2\gamma^2 \langle \Delta B^2 \rangle J(\omega_0)$$

Intensité du champ fluctuant

Proportion de fluctuation à la fréquence de Larmor

T_2

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{2T_1} + \gamma^2 \langle \Delta B_z^2 \rangle J(0)$$
$$= \frac{1}{2T_1} + \gamma^2 \langle \Delta B^2 \rangle J(0)$$
$$= \frac{1}{2}\left(2\gamma^2 \langle \Delta B^2 \rangle J(\omega_0)\right) + \gamma^2 \langle \Delta B^2 \rangle J(0)$$
$$= \gamma^2 \langle \Delta B^2 \rangle \left(J(0) + J(\omega_0)\right)$$



RMN – contraste

Relaxation

T_1

Fluctuations transverses → Échanges d'énergie

$$\frac{1}{T_1} = \gamma^2 \left(\langle \Delta B_x^2 \rangle + \langle \Delta B_y^2 \rangle\right) J(\omega_0)$$
$$= 2\gamma^2 \langle \Delta B^2 \rangle \, J(\omega_0)$$

Intensité du champ fluctuant — Proportion de fluctuation à la fréquence de Larmor

T_2

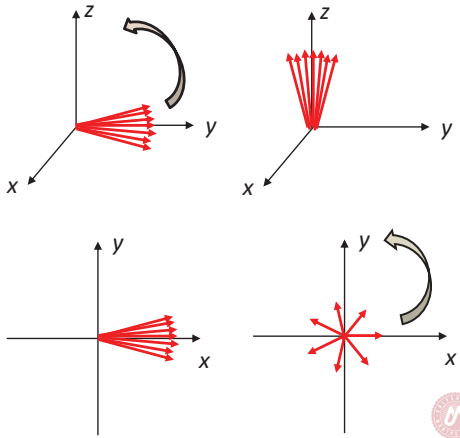
Fluctuations longitudinales → Déphasage des spins

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{2T_1} + \gamma^2 \langle \Delta B_z^2 \rangle J(0)$$

Proportion de champ statique

$$= \gamma^2 \langle \Delta B^2 \rangle \left(J(0) + J(\omega_0)\right)$$

1. $+\Delta B^2 \uparrow \quad + T_2 \downarrow$
2. $+J(0) \uparrow \quad + T_2 \downarrow$



RMN – contraste

Relaxation

T_1

Fluctuations transverses → Échanges d'énergie

$$\frac{1}{T_1} = \gamma^2 \left(\langle \Delta B_x^2 \rangle + \langle \Delta B_y^2 \rangle\right) J(\omega_0)$$
$$= 2\gamma^2 \langle \Delta B^2 \rangle \, J(\omega_0)$$

Intensité du champ fluctuant — Proportion de fluctuation à la fréquence de Larmor

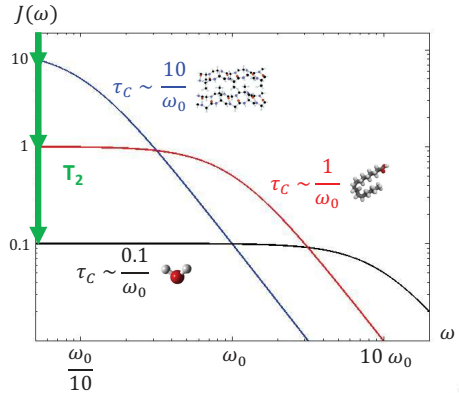
T_2

Fluctuations longitudinales → Déphasage des spins

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{2T_1} + \gamma^2 \langle \Delta B_z^2 \rangle J(0)$$

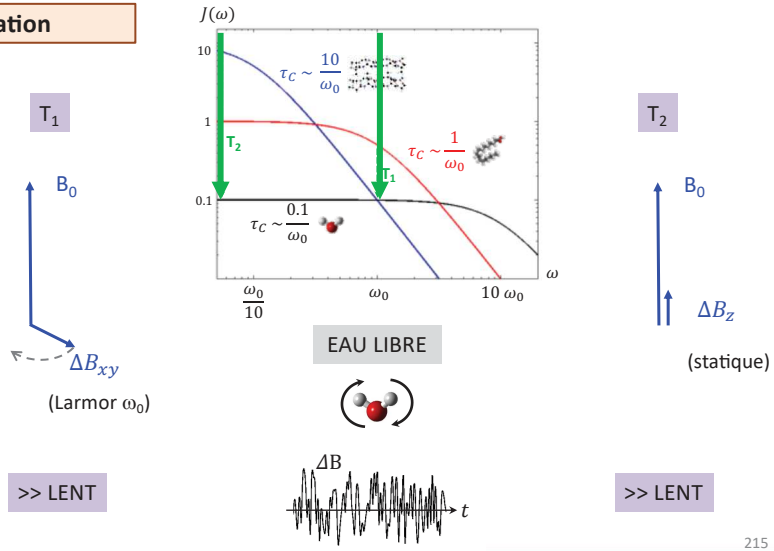
Proportion de champ statique

$$= \gamma^2 \langle \Delta B^2 \rangle \left(J(0) + J(\omega_0)\right)$$



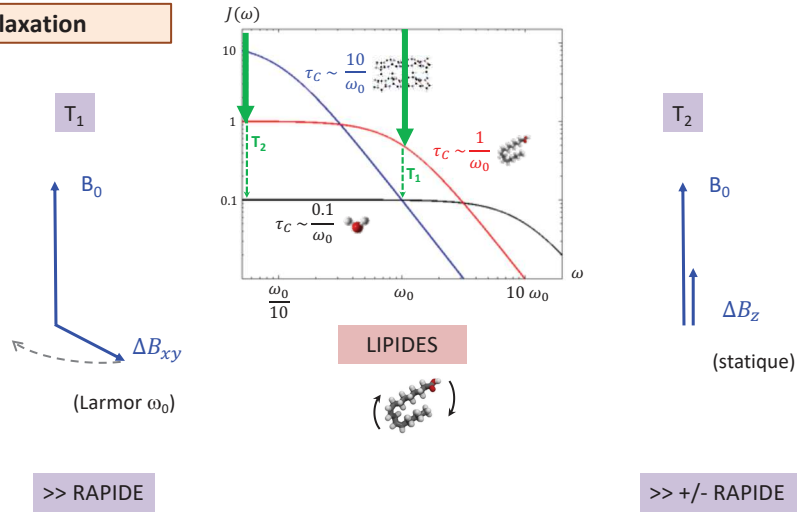
RMN – contraste

Relaxation



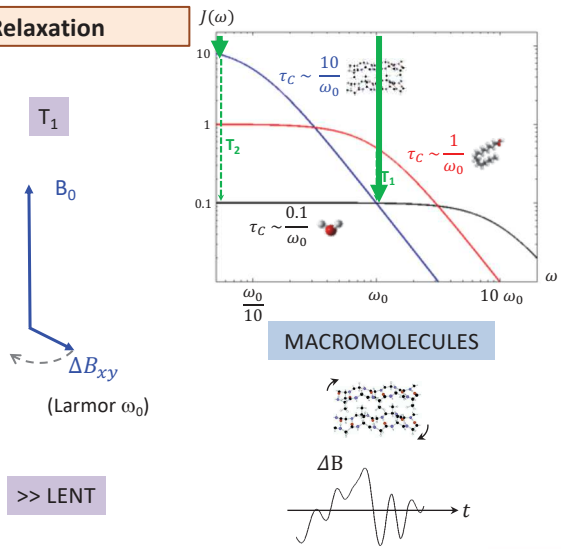
RMN – contraste

Relaxation



RMN – contraste

Relaxation



T_1

>> LENT

T_2

B_0

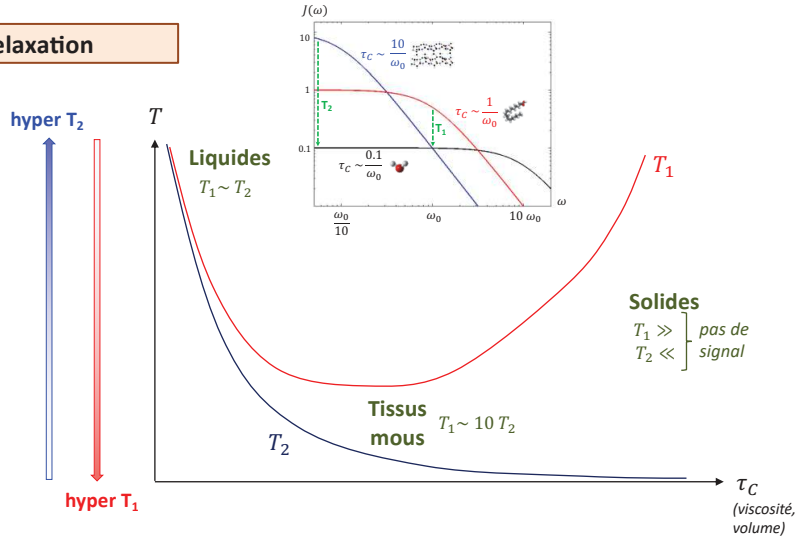
ΔB_z

(statique)

>> RAPIDE

RMN – contraste

Relaxation



RMN – contraste

Agents de contraste

Déterminants du signal :

Intrinsèques aux tissus $\rho(^1\mathrm{H})$

T_1, T_2 ⟸ Utilisation des PDC

Paramètres des séquences (extrinsèques) t_r, t_e

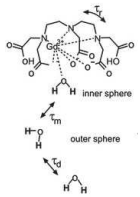
Action des PDC IRM est indirecte, le produit lui-même n'est pas visible ≠ iode/RX

Influence des PDC sur les temps de relaxation des protons des molécules d'eau environnantes.

RMN – contraste

Agents de contraste: agents paramagnétiques

- Chélates d'ions métalliques paramagnétiques **Gd^{3+}** possédant 7 électrons non appariés
- Moment magnétique électronique important
- Interaction entre *spin électronique* des électrons célibataires et *spin nucléaire* des protons à proximité
- Augmentation de la vitesse de relaxation (= raccourcissement du T1 à faible concentration du Gd)
- Augmentation signal
- Agent à contraste positif



G. Strijkers, 2007

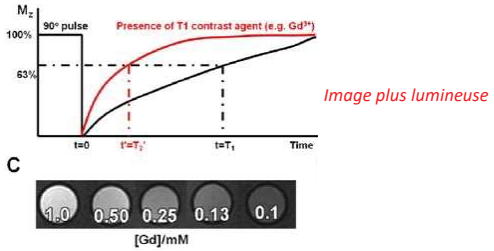


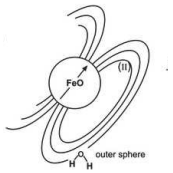
Image plus lumineuse

Copyright Wiley–VCH Verlag GmbH & Co.

RMN – contraste

Agents de contraste: agents superparamagnétiques

- Nanoparticules de dextran enveloppant un noyau d'oxyde de **Fe^{3+}** avec 4 électrons non appariés
- Moment magnétique électronique et susceptibilité magnétiques importants
- Création d'inhomogénéités locales de champ magnétique
- Accélération de la vitesse de relaxation (= raccourcissement du T2 <u>et</u> du T2*)
- Augmentation signal
- Agent à contraste négatif



G. Strijkers, 2007

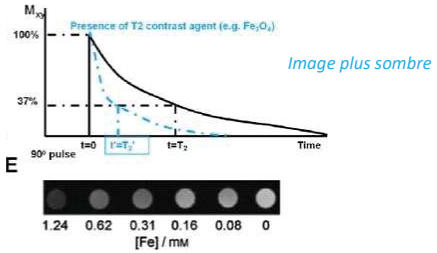


Image plus sombre

Copyright Wiley–VCH Verlag GmbH & Co.