



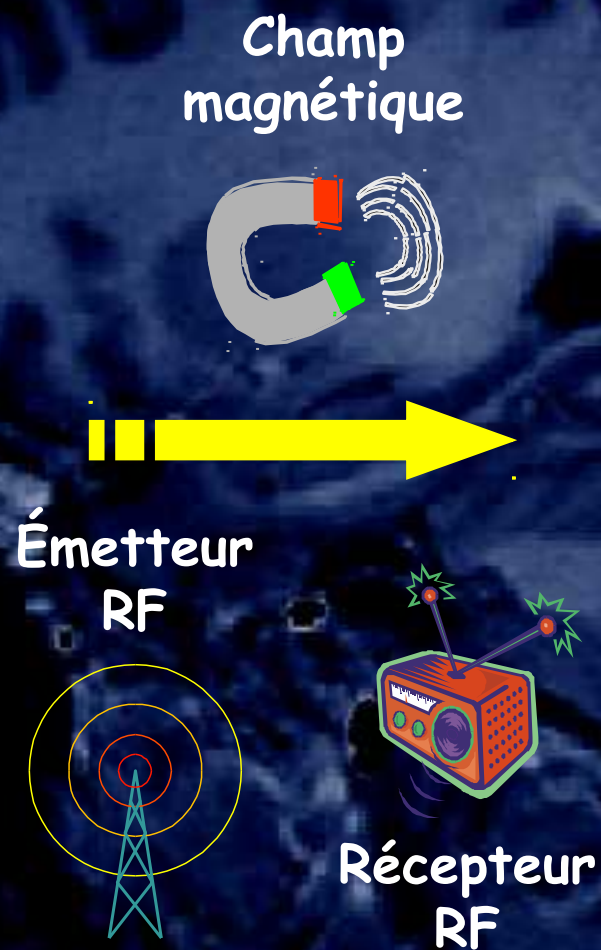
BASES DU SIGNAL EN

I(IMAGERIE) par **R**(RESONANCE) **M**(MAGNETIQUE)

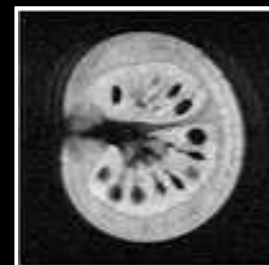
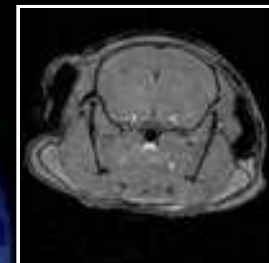
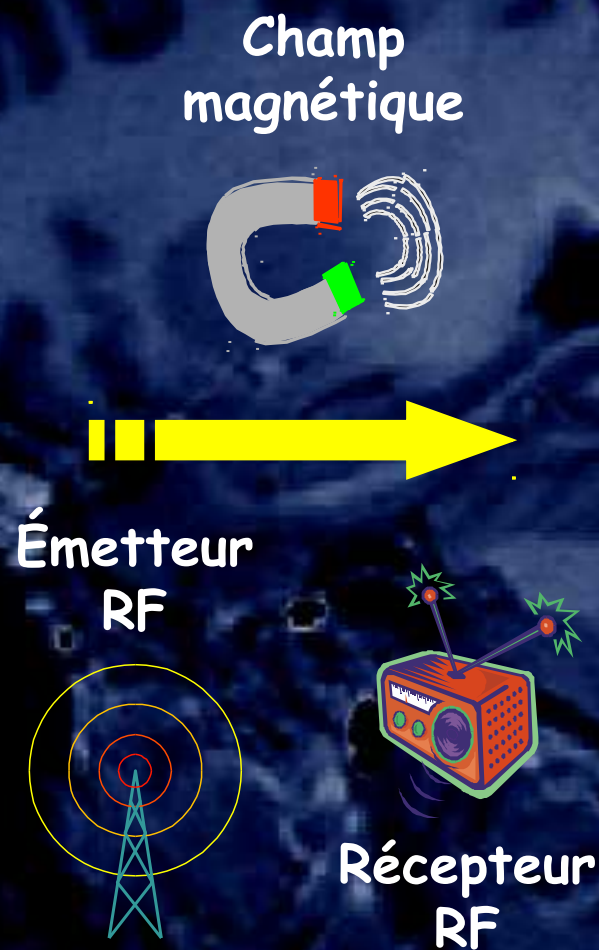
Muriel ROTH

Centre d'IRM fonctionnelle de Marseille

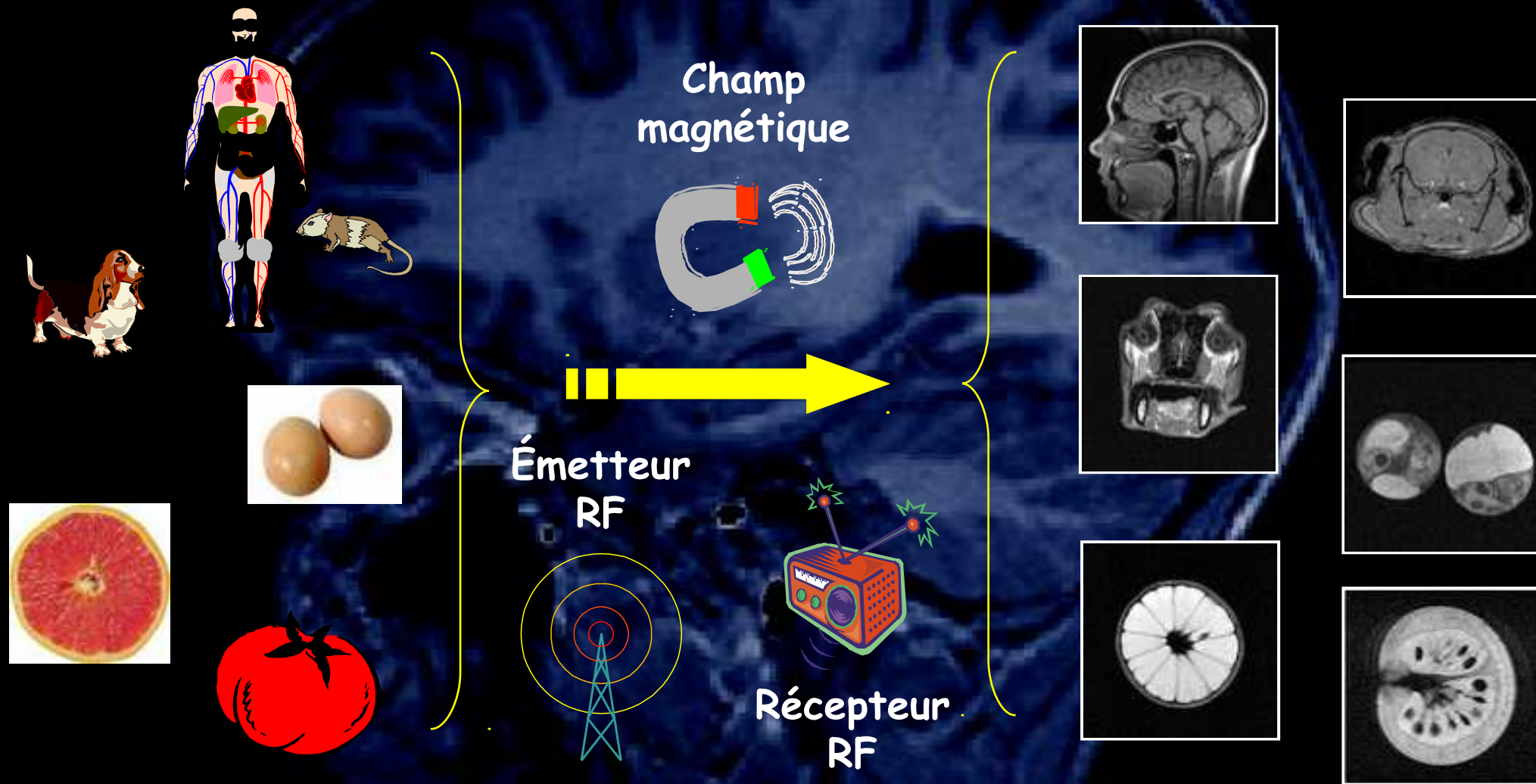
Les outils du "RMNiste"



Les outils du "RMNiste"



Les outils du "RMNiste"



Propriétés magnétiques des particules

La polarisation

La résonance

La relaxation

Lecture du signal

Le SPIN d'une particule

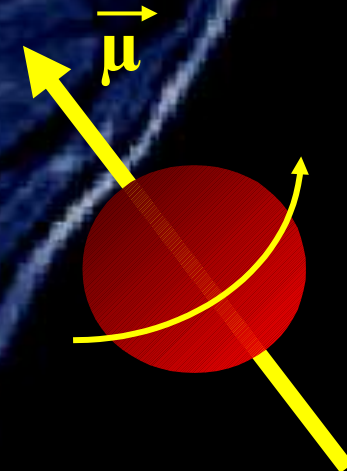
Chaque particule se comporte comme une micro-boussole qui tourne sur elle-même.

Cette propriété magnétique intrinsèque est associée au moment cinétique :

$$\vec{\mu} = \gamma \cdot \vec{I}$$

où $\vec{\mu}$ est le moment magnétique,
 γ est le rapport gyromagnétique,
et \vec{I} est le moment cinétique.

Analogie
avec la terre

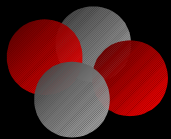
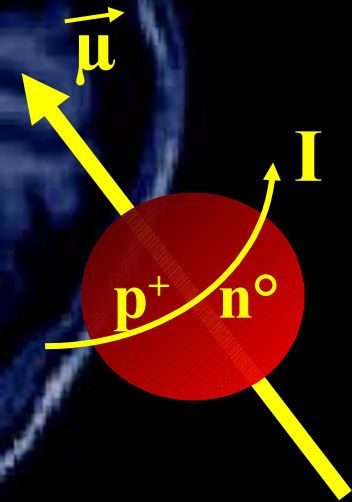


Le SPIN nucléaire

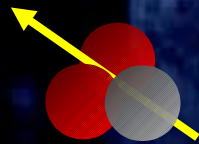
Le SPIN nucléaire caractérise la propriété magnétique intrinsèque du noyau atomique.

Il est défini par le nombre I entier ou demi-entier.

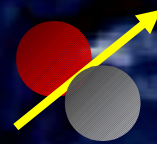
C'est la combinaison des spins des protons p^+ et des neutrons n^0 du noyau.



Hélium 4
SPIN nul



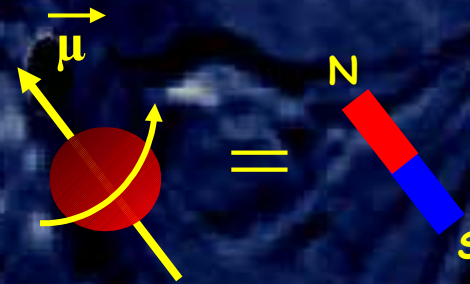
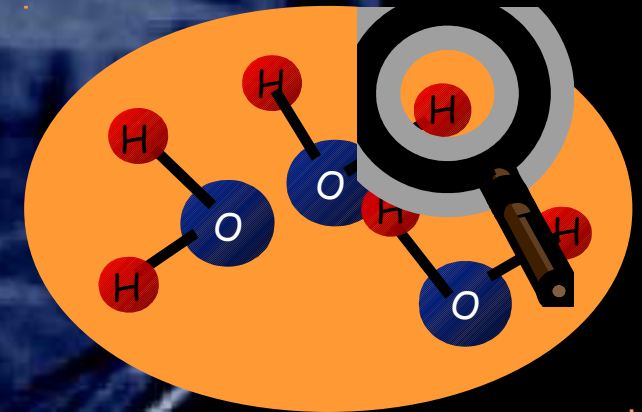
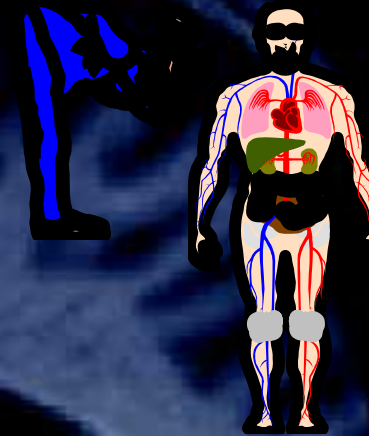
Tritium
SPIN 1/2



Deutérium
SPIN 1

Le signal RMN utilise les propriétés magnétiques des noyaux.

⇒ Les noyaux de SPIN nul ne donnent pas de signal en RMN.



Les noyaux utilisables en RMN

A
X
Z

A : nombre de masse ($n^{\circ} + p^+$)

Z : numéro atomique (p^+)

Condition :
A impair, Z pair ou impair

si A et Z pairs \longrightarrow pas utilisables en RMN (${}^6_{12}\text{C}$, ${}^8_{16}\text{O}$)

si A pair et Z impair \longrightarrow spin entier (${}^2_1\text{H}$, ${}^{14}_7\text{N}$)

si A impair \longrightarrow utilisables en RMN, spin demi-entier
($I=1/2$ pour ${}^1_1\text{H}$, ${}^{19}_9\text{F}$, ${}^{31}_{15}\text{P}$
 $I=3/3$ pour ${}^{11}_5\text{B}$, ${}^7_3\text{Li}$
 $I=5/2$ pour ${}^{27}_{13}\text{Al}$)

Les noyaux utilisables en RMN

	Noyau	Spin	Abondance naturelle	Rapport gyromagnétique γ
<i>intrinsèques</i>	^1H	1/2	99.98 %	$2,68 \cdot 10^8 \text{ rad/T/s}$
	^{31}P	1/2	100 %	10,5
	^{13}C	1/2	1,11 %	6,7
<i>administrables</i>	^{23}Na	3/2	100 %	7,0
	^{19}F	1/2	100 %	25,2

Le noyau d'hydrogène

75% d'eau dans le corps humain

2 atomes d'hydrogène par molécule d'eau

Nomenclature RMN : les spins, les protons

Le phénomène de RMN peut être décomposé en trois étapes :

1. La polarisation

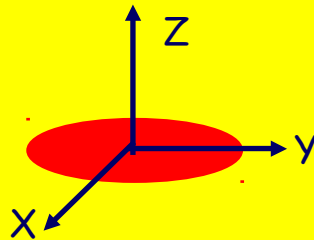
2. La résonance

3. La relaxation

Il existe deux modèles pour décrire ce phénomène :

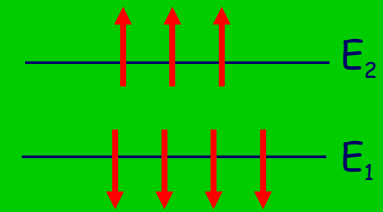
1. Le modèle vectoriel
basé sur les équations de Bloch

Description du
phénomène
dans un repère
cartésien :



2. Le modèle énergétique
basé sur la mécanique quantique

Description du
phénomène
dans un diagramme
énergétique



Les propriétés magnétiques des particules

La polarisation

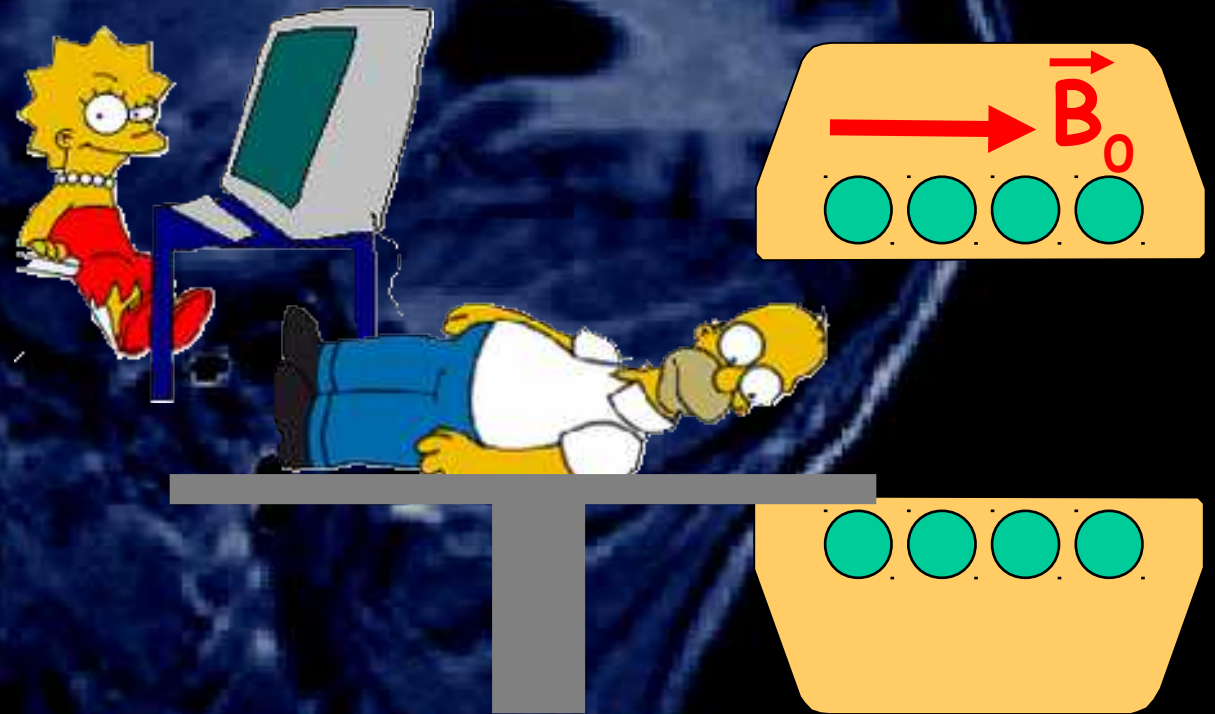
La résonance

La relaxation

La lecture du signal

La polarisation

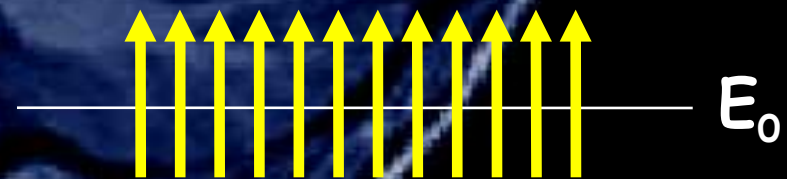
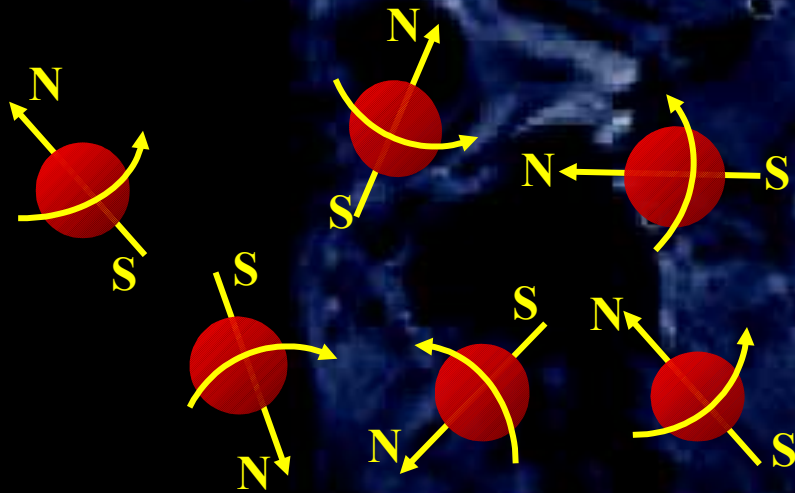
Elle se produit lors de l'introduction du patient dans le champ magnétique B_0 .



En absence de champ magnétique

Les spins s'orientent de manière aléatoire.

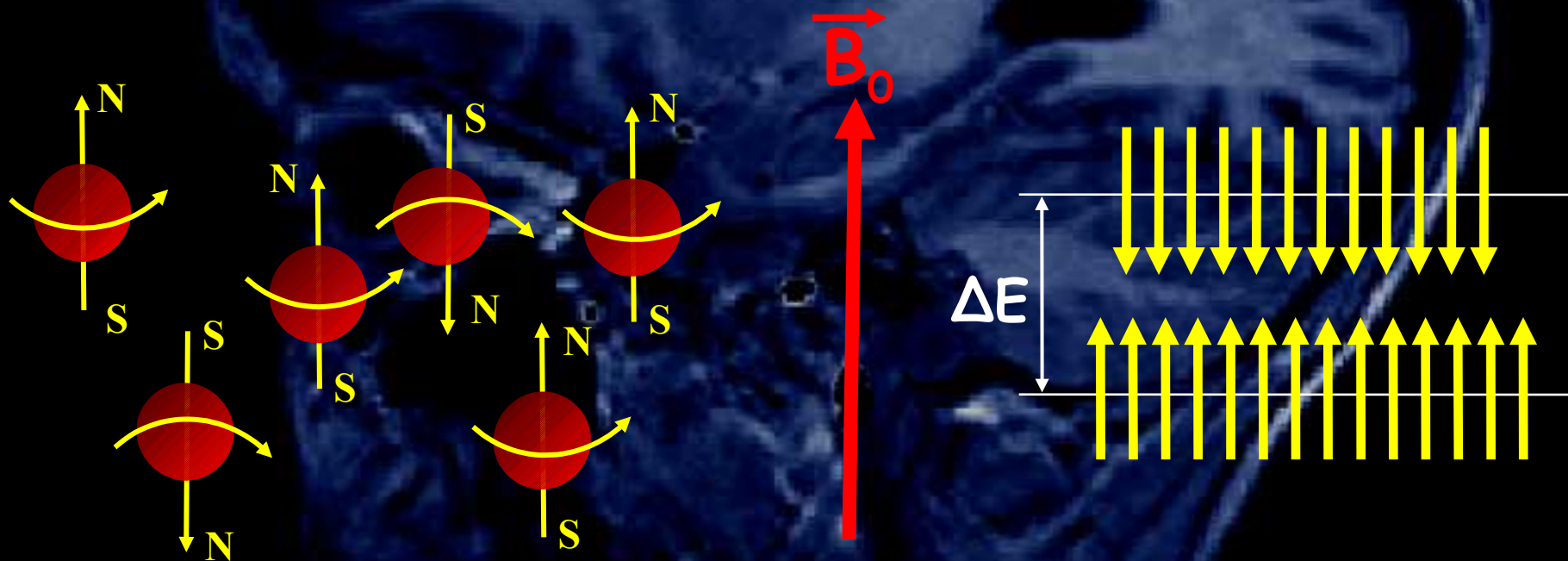
Les spins ont le même niveau d'énergie moyen.



En présence d'un champ magnétique B_0

Les spins s'orientent parallèlement à B_0 .

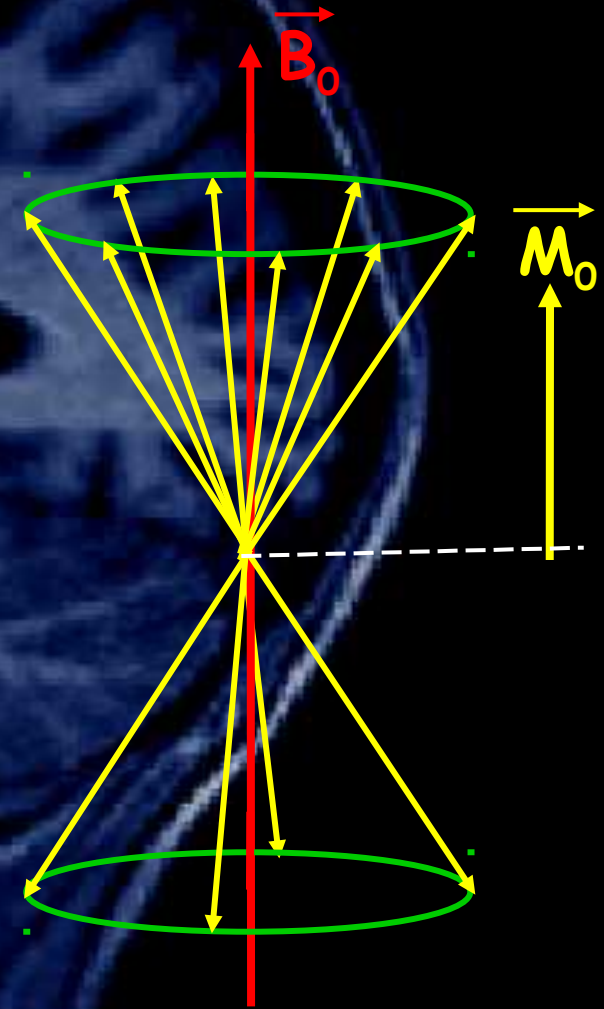
Les spins se répartissent sur 2 niveaux d'énergie.



Pour être plus précis, les spins se répartissent sur un bicône d'axe \vec{B}_0 , avec un excès de spins orientés parallèlement à \vec{B}_0 .

Ceci induit l'apparition un vecteur d'aimantation macroscopique \vec{M}_0 parallèle à \vec{B}_0 (\vec{M}_0 correspond à la somme vectorielle de tous les spins).

\vec{M}_0 augmente lorsque le champ magnétique \vec{B}_0 augmente.

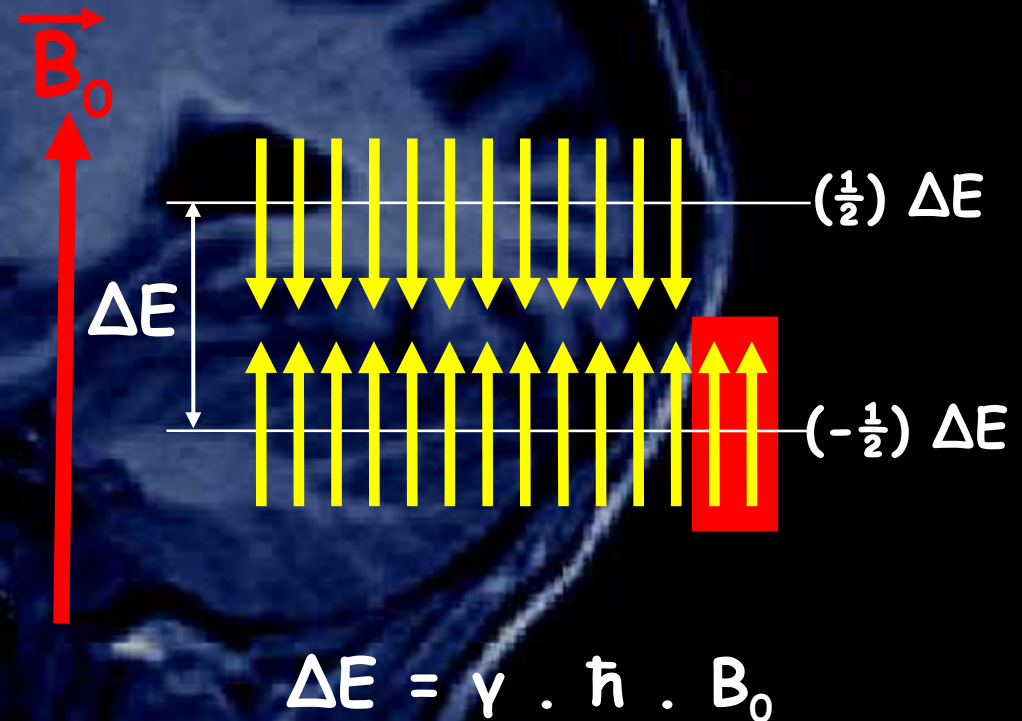


Ce qui se traduit dans le modèle quantique par l'existence d'un excès de spins δN sur le niveau d'énergie le plus bas :

$$\delta N \approx N \frac{\gamma \hbar B_0}{2 k T}$$

où N est le nombre total de spins,
 \hbar est la constante de Planck ($h/2\pi$),
 k est la constante de Boltzmann,
 et T est la température.

($\delta N \sim 1 / 1 \text{ million}$)



Les propriétés magnétiques des particules

La polarisation

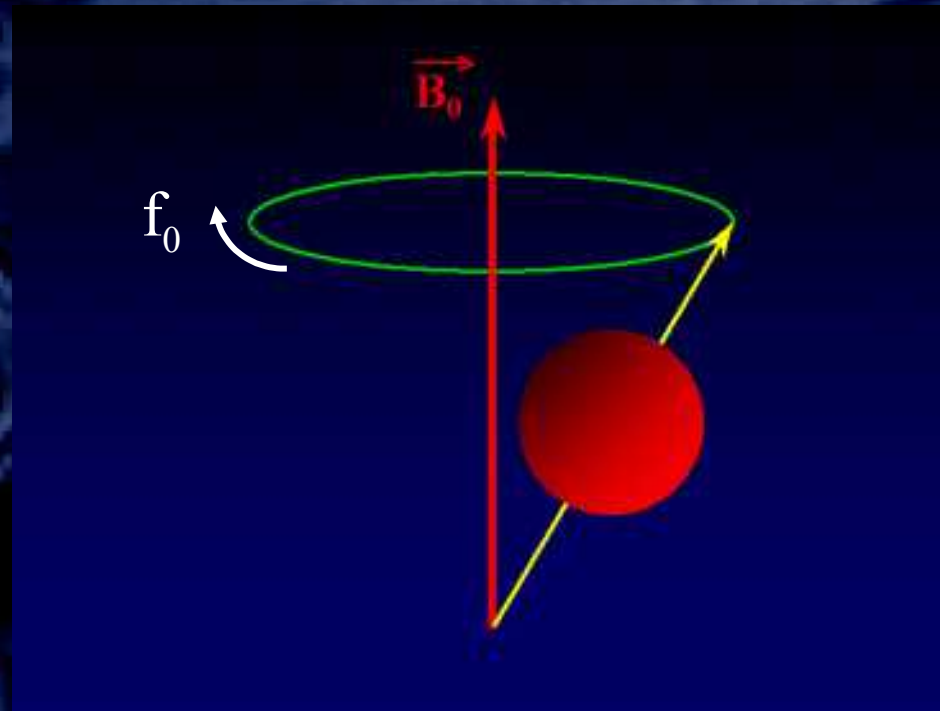
La résonance

La relaxation

La lecture du signal

La précession

Les spins tournent autour de B_0 à la fréquence de Larmor f_0 .



$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \gamma B_0$$

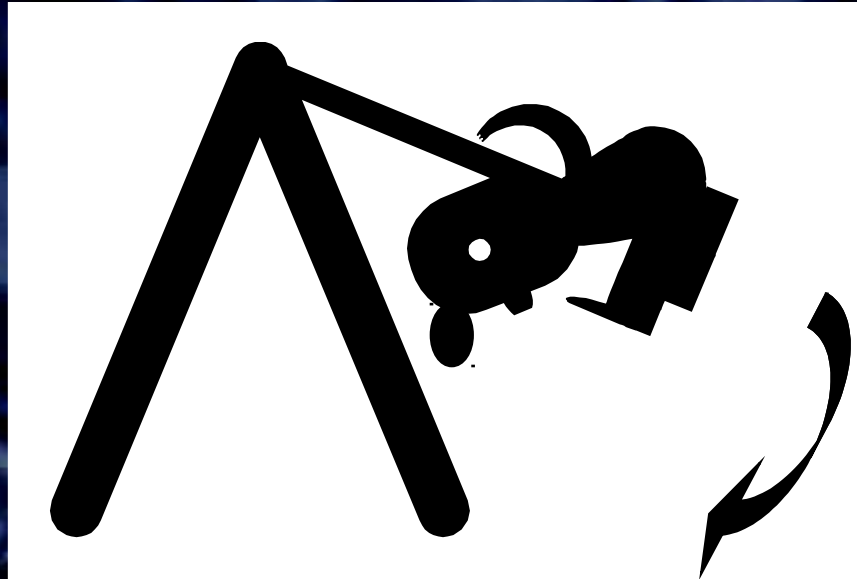
La fréquence de Larmor

Champ magnétique	Fréquence de Larmor
0,5 T	21 MHz
1,5 T	64 MHz
3 T	128 MHz
7 T	300 MHz

La fréquence de précession (ou de résonance) des spins est proportionnelle au champ magnétique B_0

$$f_0 = \gamma / 2\pi \cdot B_0 = \chi B_0$$

Les systèmes résonants

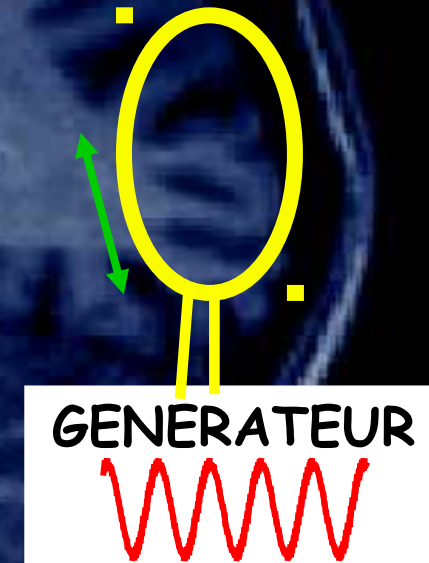


Un système est résonant lorsqu'il est susceptible de modifier son état d'équilibre et d'emmagasiner de l'énergie sous l'influence d'une sollicitation externe à une fréquence particulière.

La résonance : un échange d'énergie

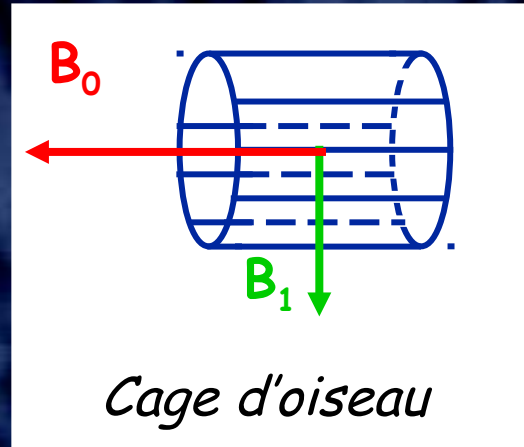
Un courant électrique oscillant exactement à la fréquence de résonance des spins est appliqué pendant une période τ dans une antenne à proximité de l'échantillon.

Ce courant va induire une onde radio-fréquence perpendiculaire à B_0 qui va perturber le système de spins.



Création d'un courant alternatif dans une spire

Les antennes d'émission

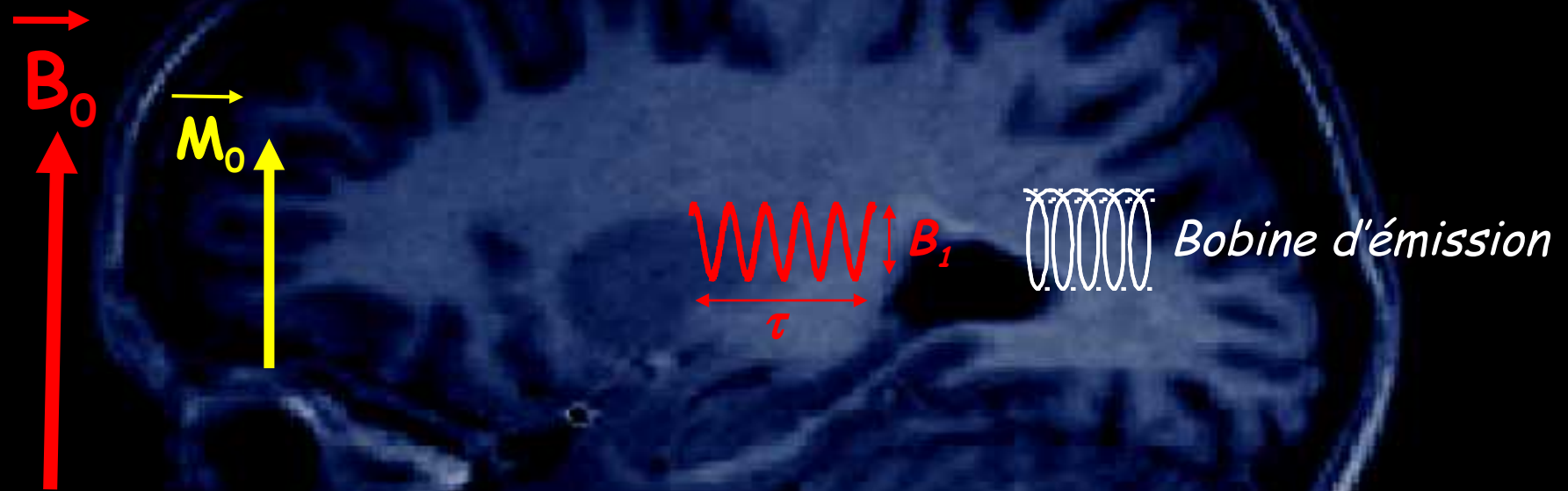


Antenne = circuit résonant (R, L, C)

Champ \vec{B}_1 délivré par l'antenne perpendiculaire à \vec{B}_0

Accord à la fréquence de résonance du proton
Adaptation en impédance aux circuits électroniques

Perturbation de l'état d'équilibre



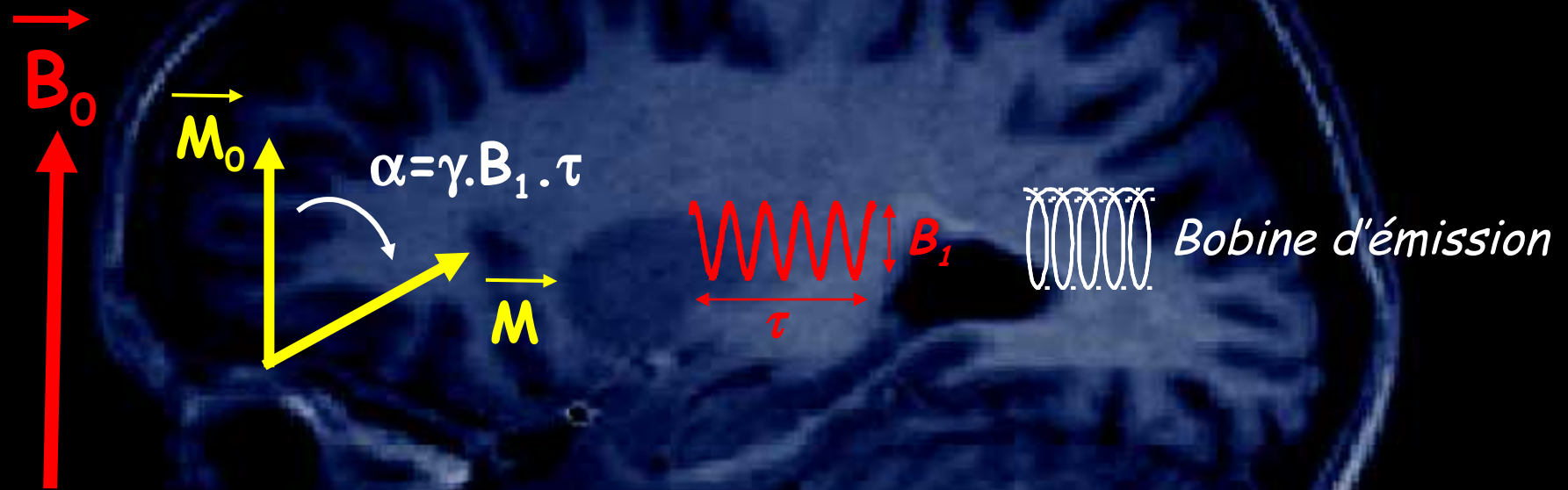
Onde radio B_1 = onde de radiofréquence, RF, électromagnétique

Condition de résonance :

B_1 perpendiculaire à B_0

B_1 à la fréquence de résonance des protons

Perturbation de l'état d'équilibre



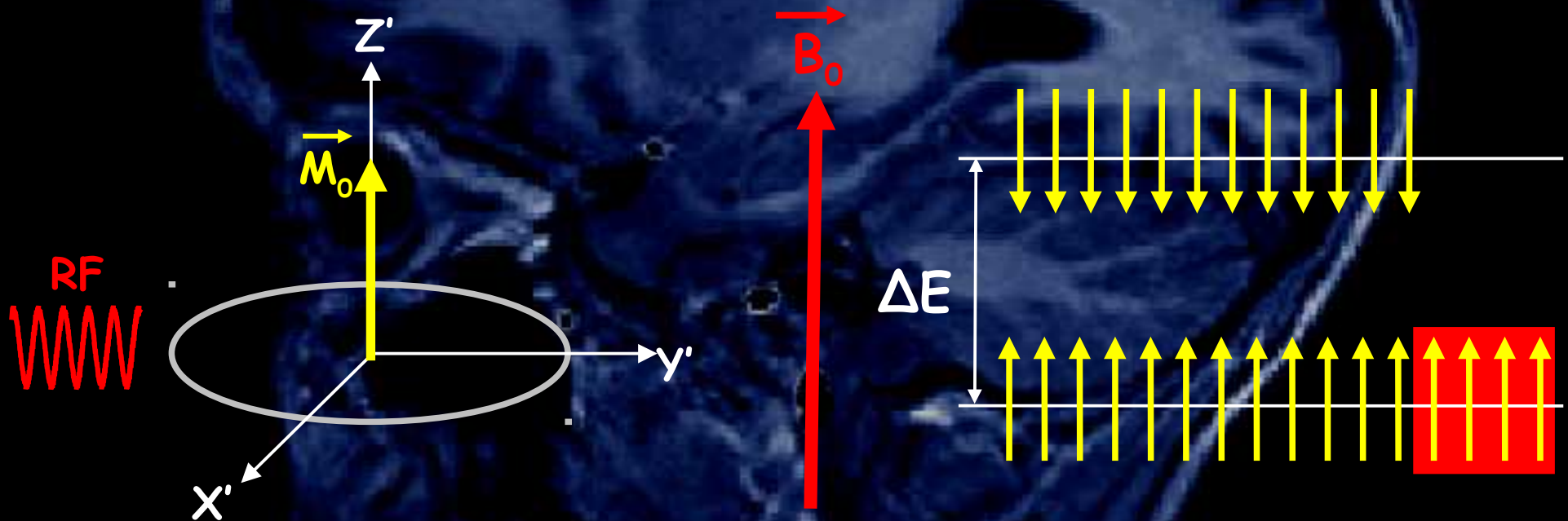
L'aimantation macroscopique tourne d'un angle α proportionnel :

- à l'amplitude du champ d'émission B_1
- à la durée de l'émission

Perturbation de l'état d'équilibre

Le vecteur \vec{M}_0 passe dans le plan transverse (perpendiculaire à B_0).

Egalisation des populations de spins sur les 2 niveaux d'énergie.

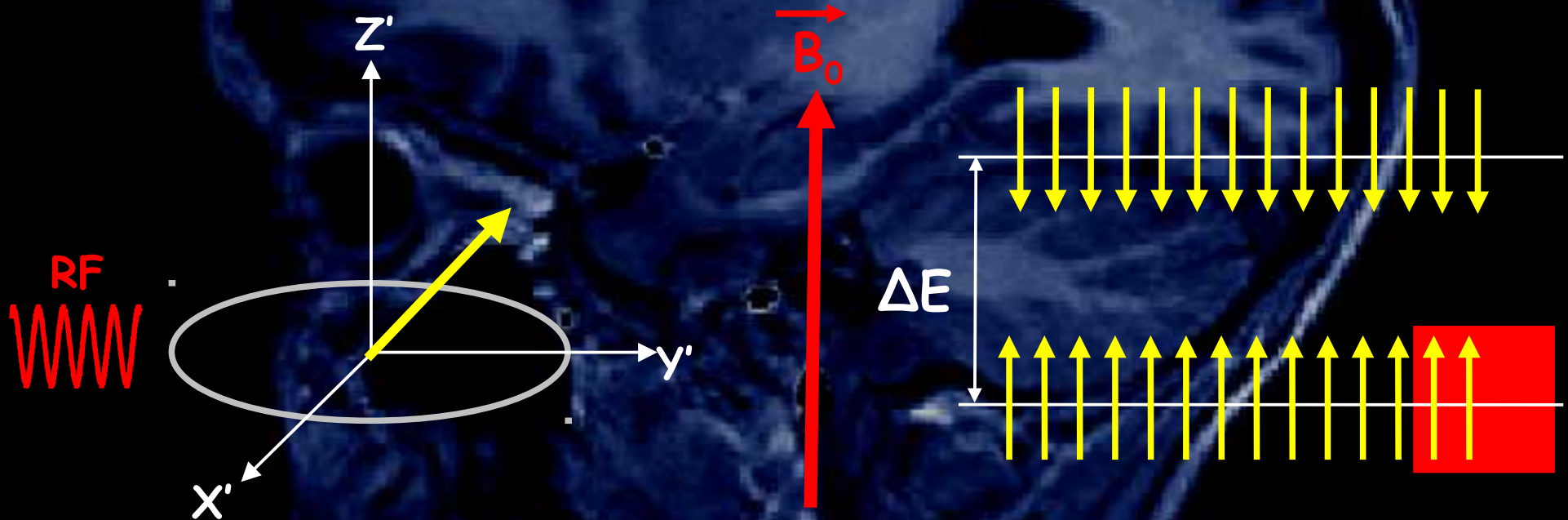


Le référentiel (X', Y', Z') tourne à la fréquence f_0 par rapport à (X, Y, Z) .

Perturbation de l'état d'équilibre

Le vecteur \vec{M}_0 passe dans le plan transverse (perpendiculaire à B_0).

Egalisation des populations de spins sur les 2 niveaux d'énergie.

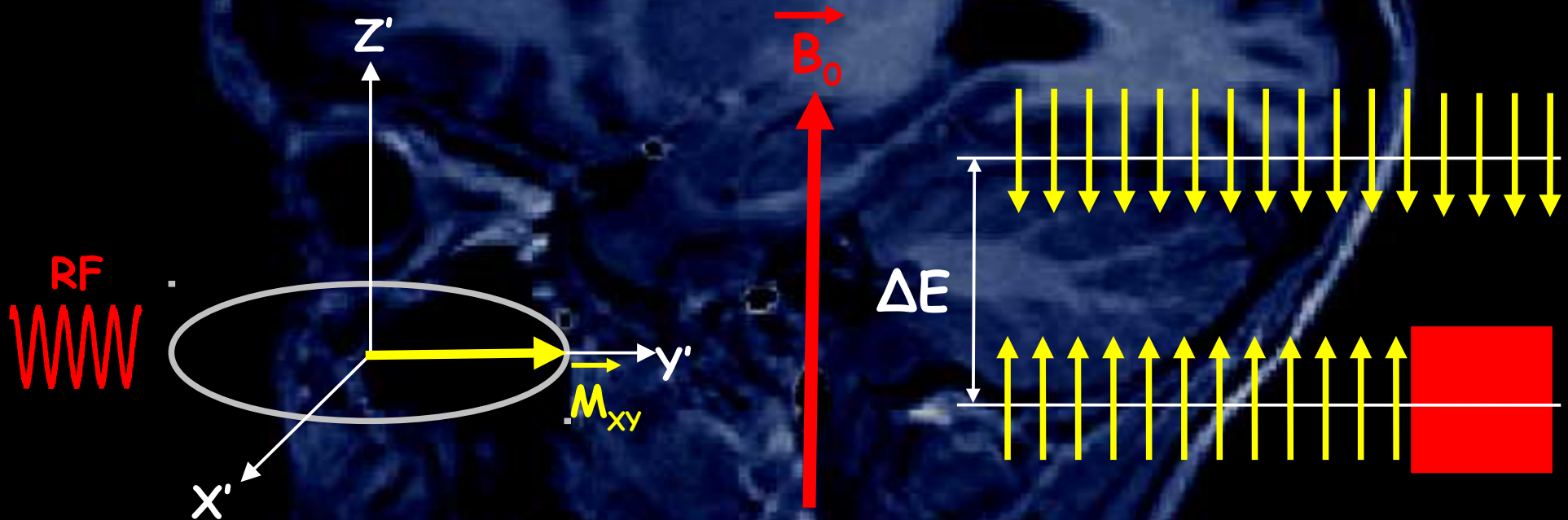


Le référentiel (X', Y', Z') tourne à la fréquence f_0 par rapport à (X, Y, Z) .

Perturbation de l'état d'équilibre

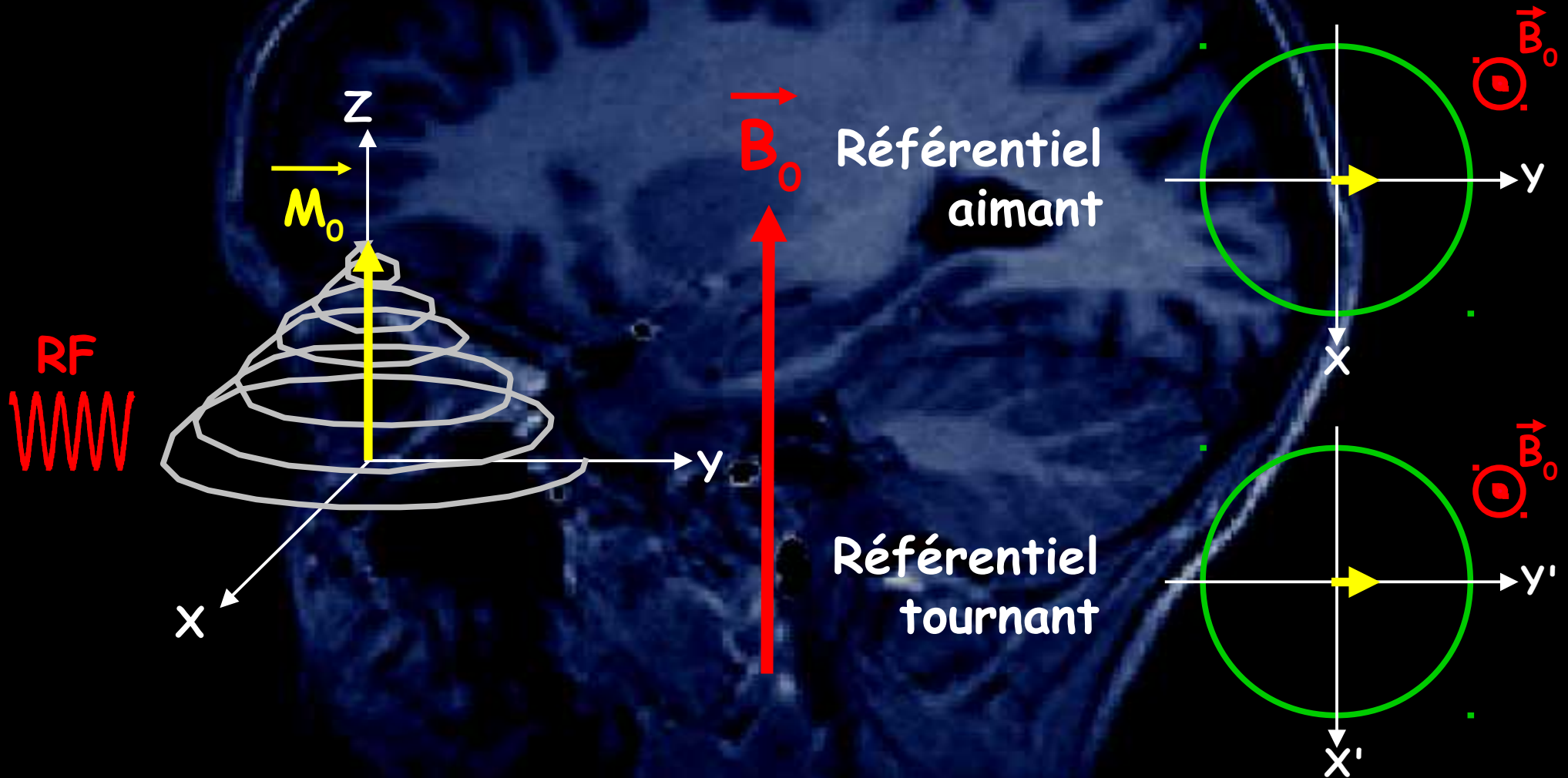
Le vecteur \vec{M}_0 passe dans le plan transverse (perpendiculaire à B_0).

Egalisation des populations de spins sur les 2 niveaux d'énergie.

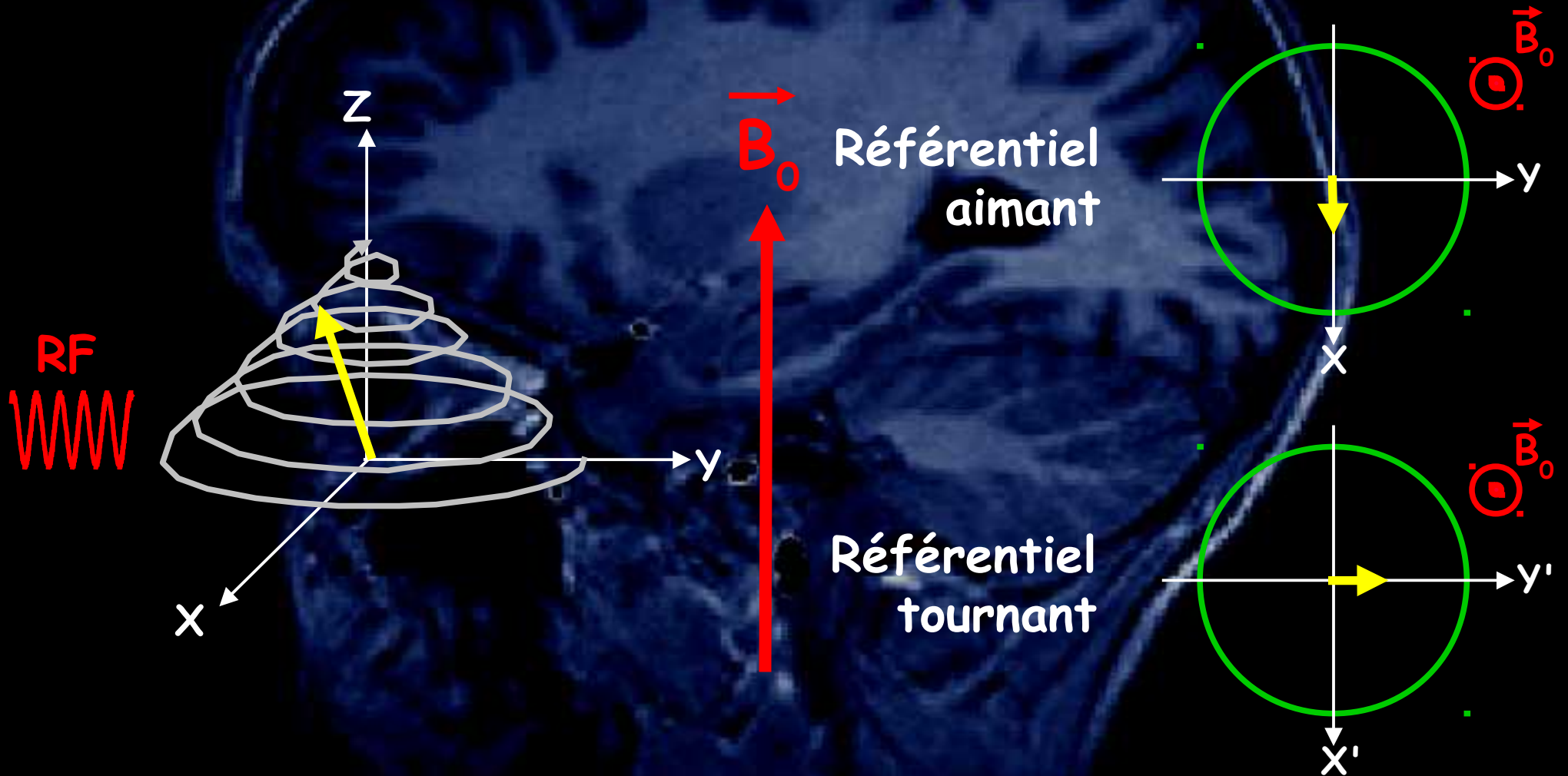


Le référentiel (X', Y', Z') tourne à la fréquence f_0 par rapport à (X, Y, Z) .

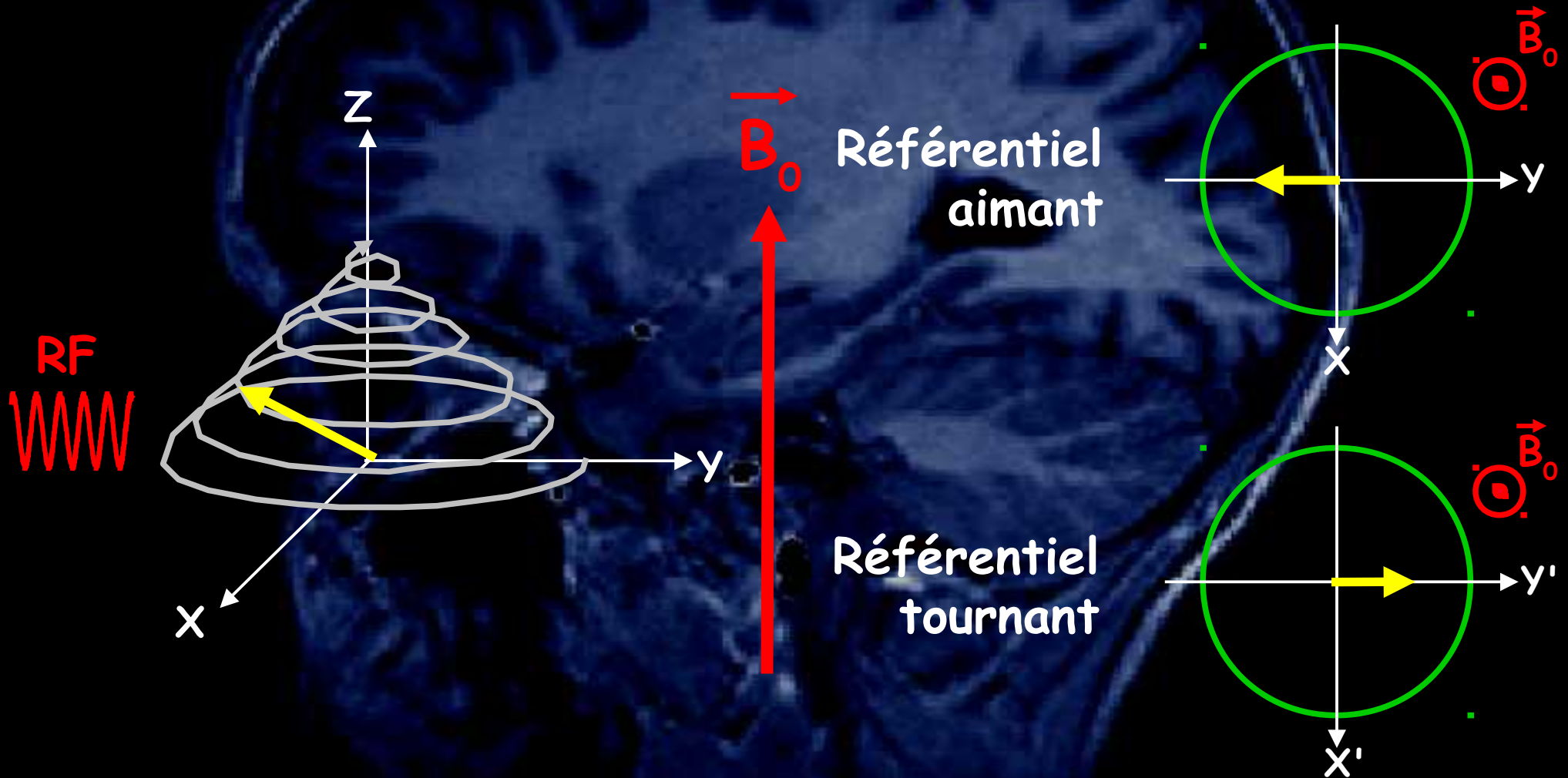
Le référentiel tournant



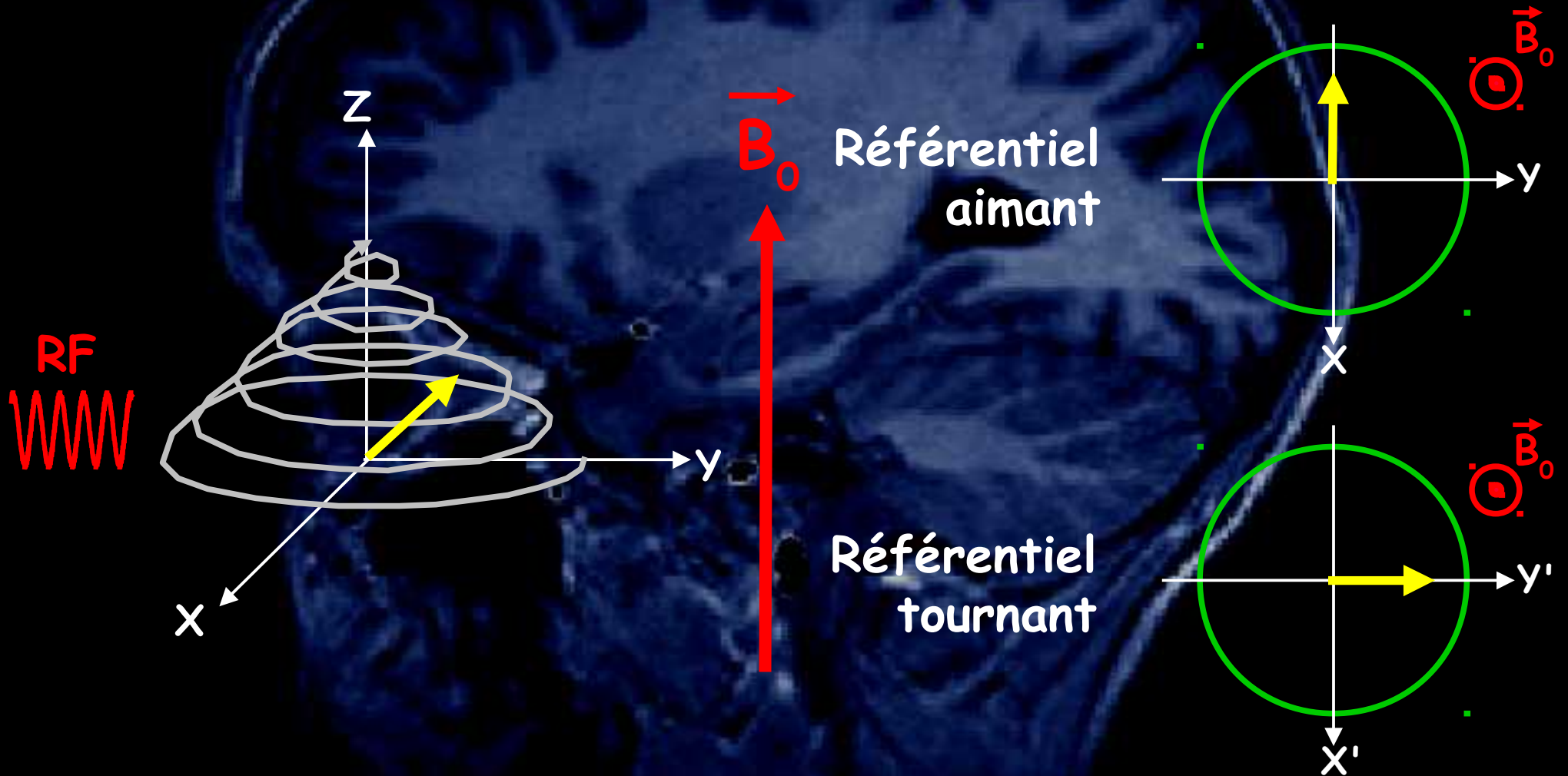
Le référentiel tournant



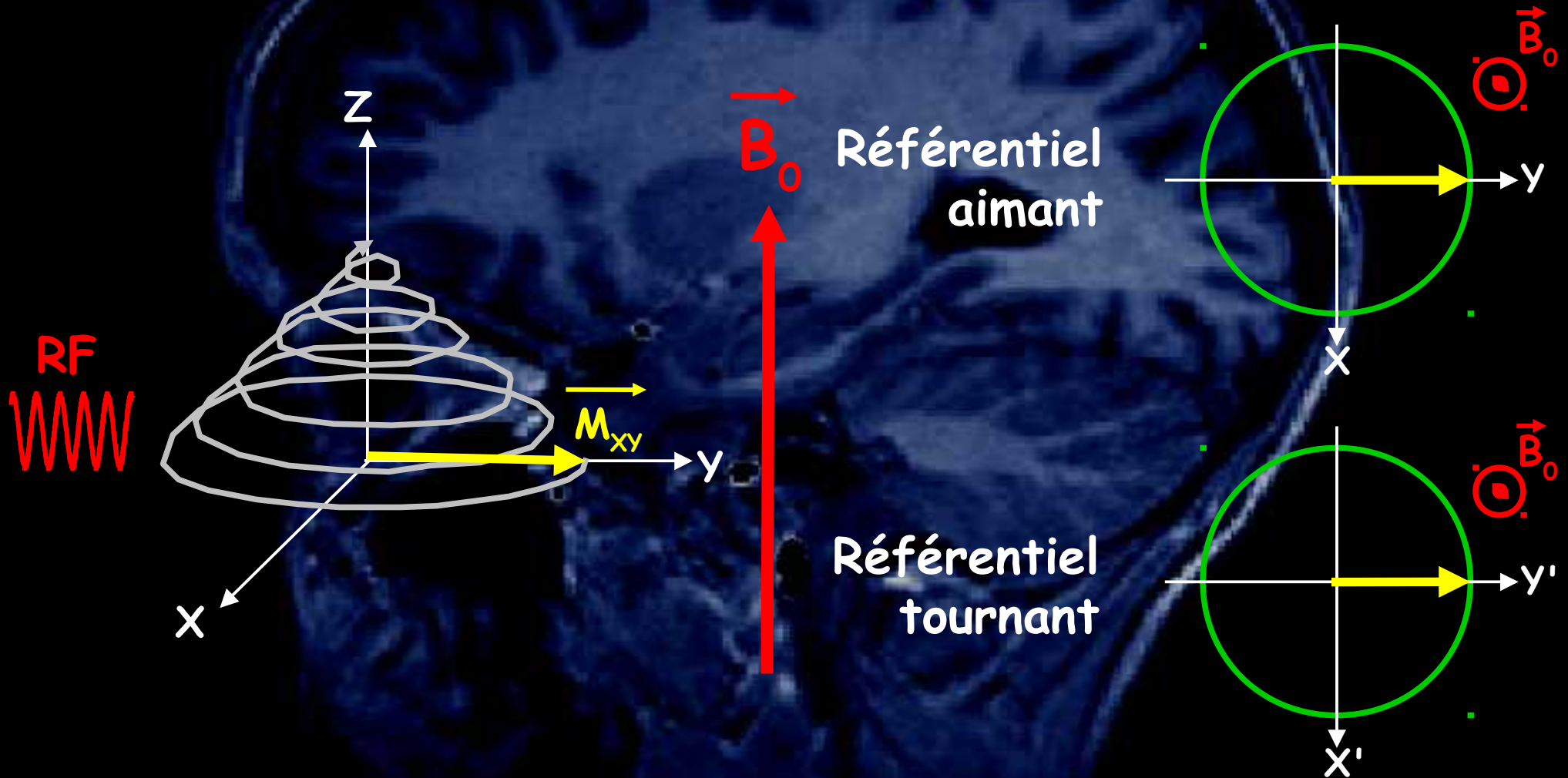
Le référentiel tournant



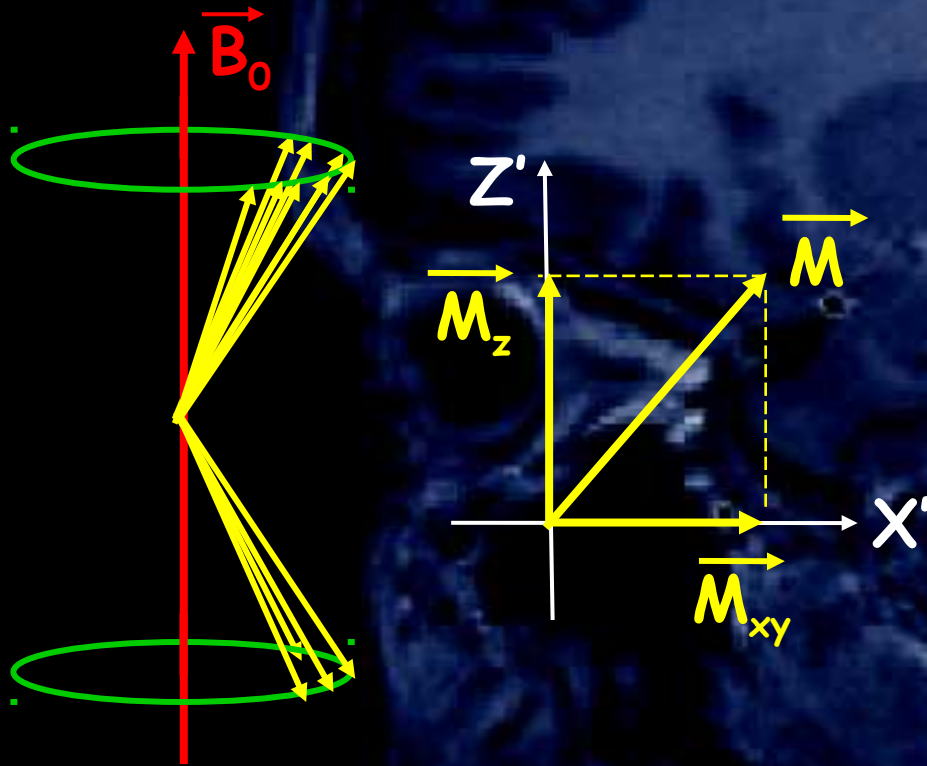
Le référentiel tournant



Le référentiel tournant



Vecteur aimantation



PROJECTION sur les axes X' et Z'

Deux composantes :

\vec{M}_{xy} aimantation transverse
(perpendiculaire à \vec{B}_0)

\vec{M}_z aimantation longitudinale
(dans le sens de \vec{B}_0)

Les propriétés magnétiques des particules

La polarisation

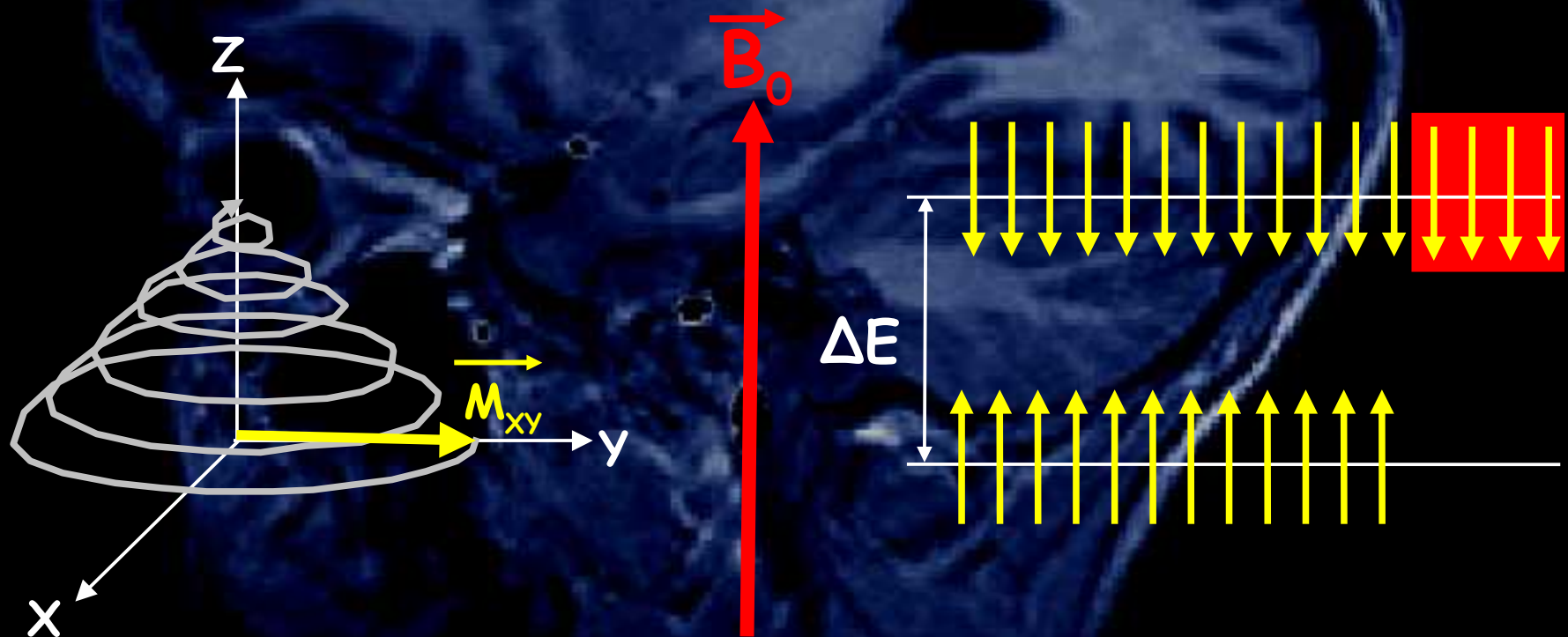
La résonance

La relaxation

La lecture du signal

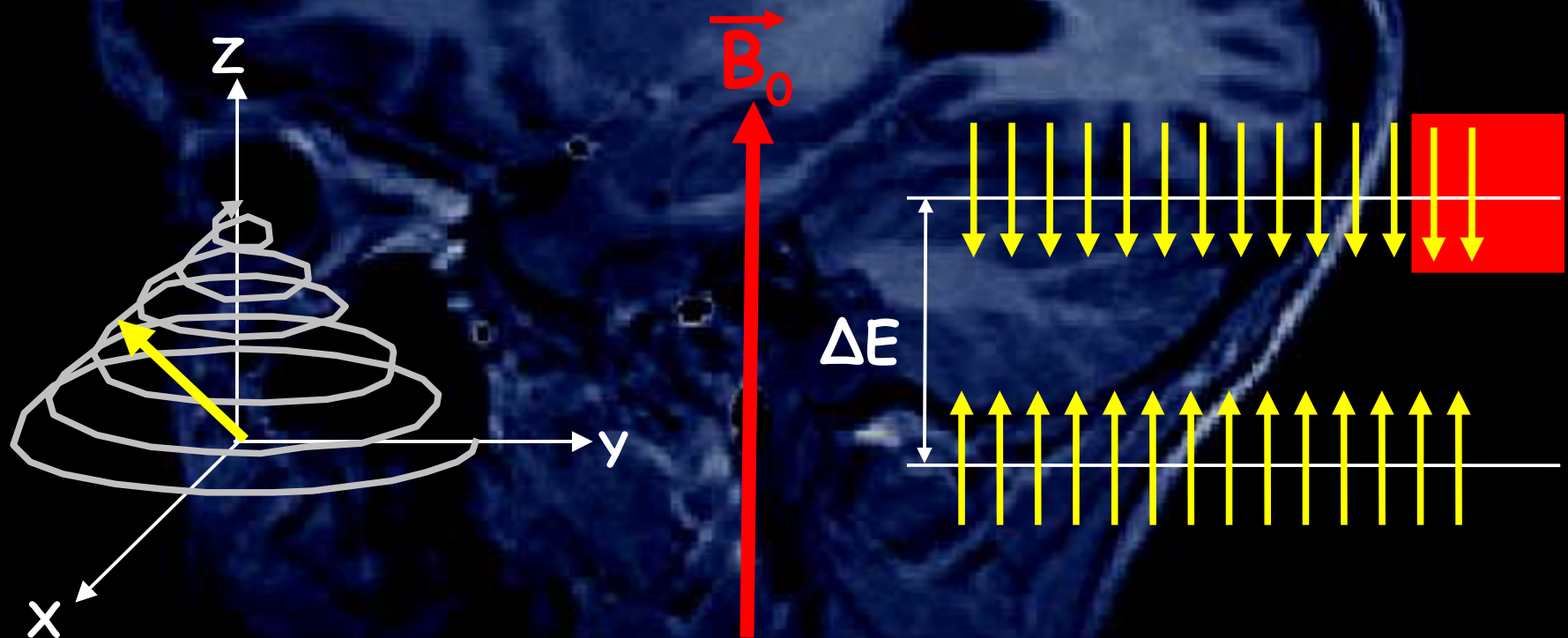
La relaxation caractérise le retour à l'équilibre du système de spins.

Elle débute lorsque la RF s'arrête et traduit un échange d'énergie avec le milieu.



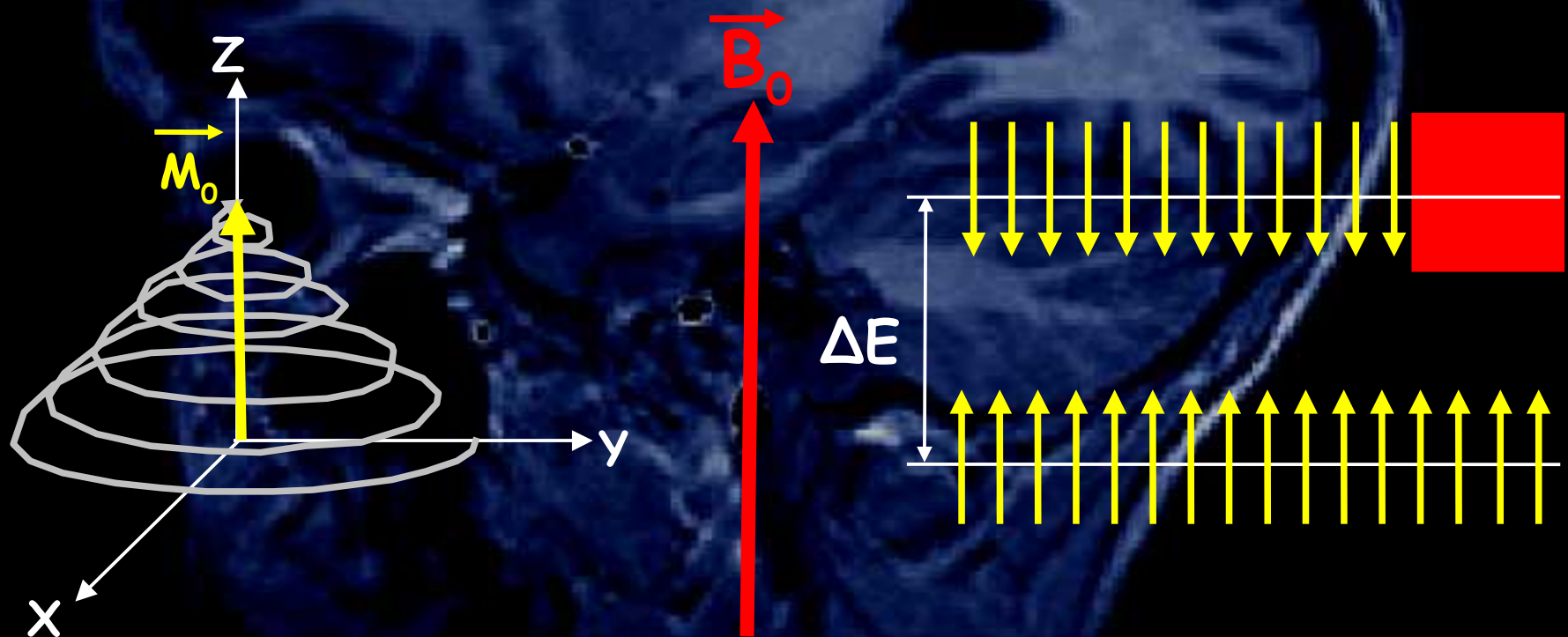
La relaxation caractérise le retour à l'équilibre du système de spins.

Elle débute lorsque la RF s'arrête et traduit un échange d'énergie avec le milieu.

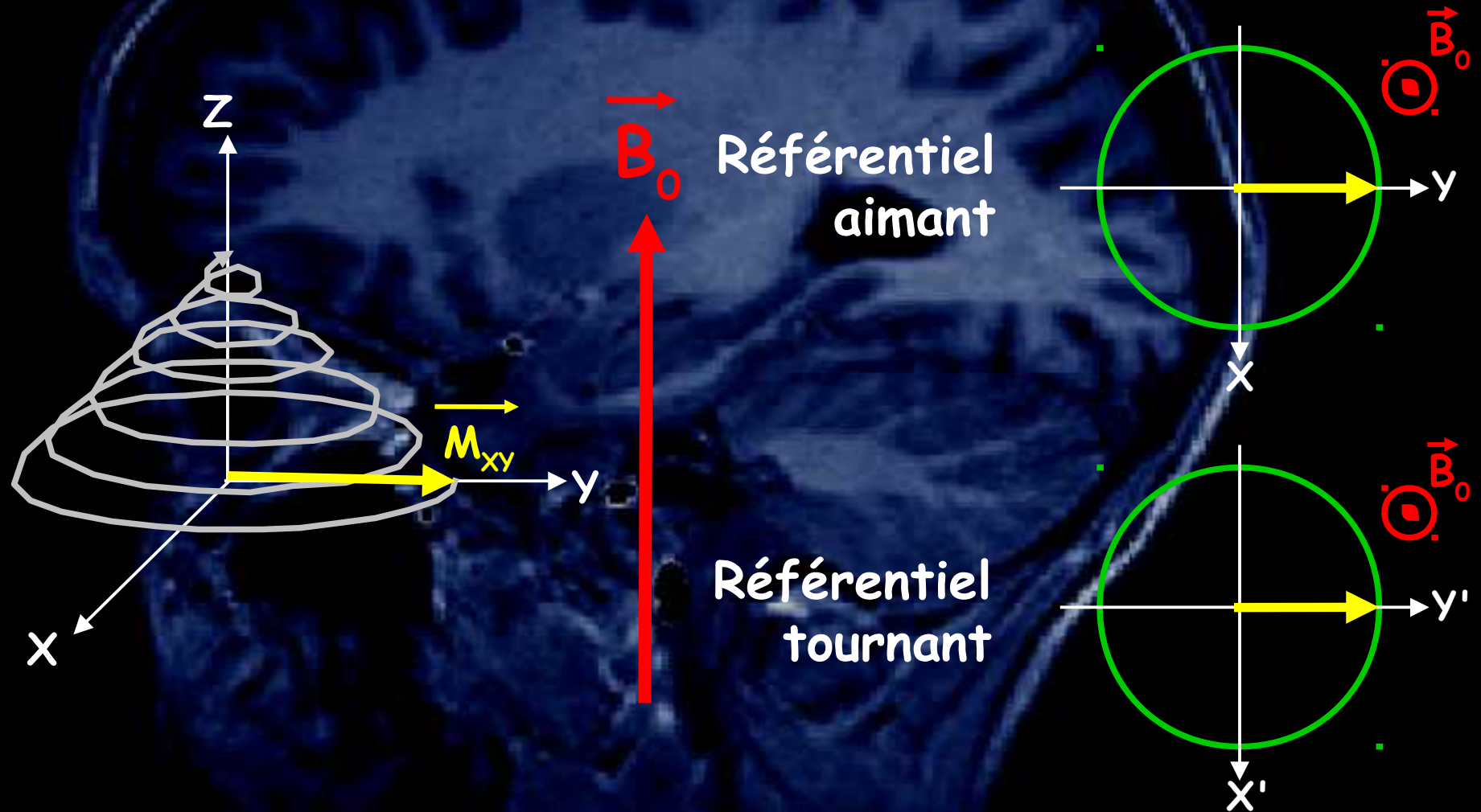


La relaxation caractérise le retour à l'équilibre du système de spins.

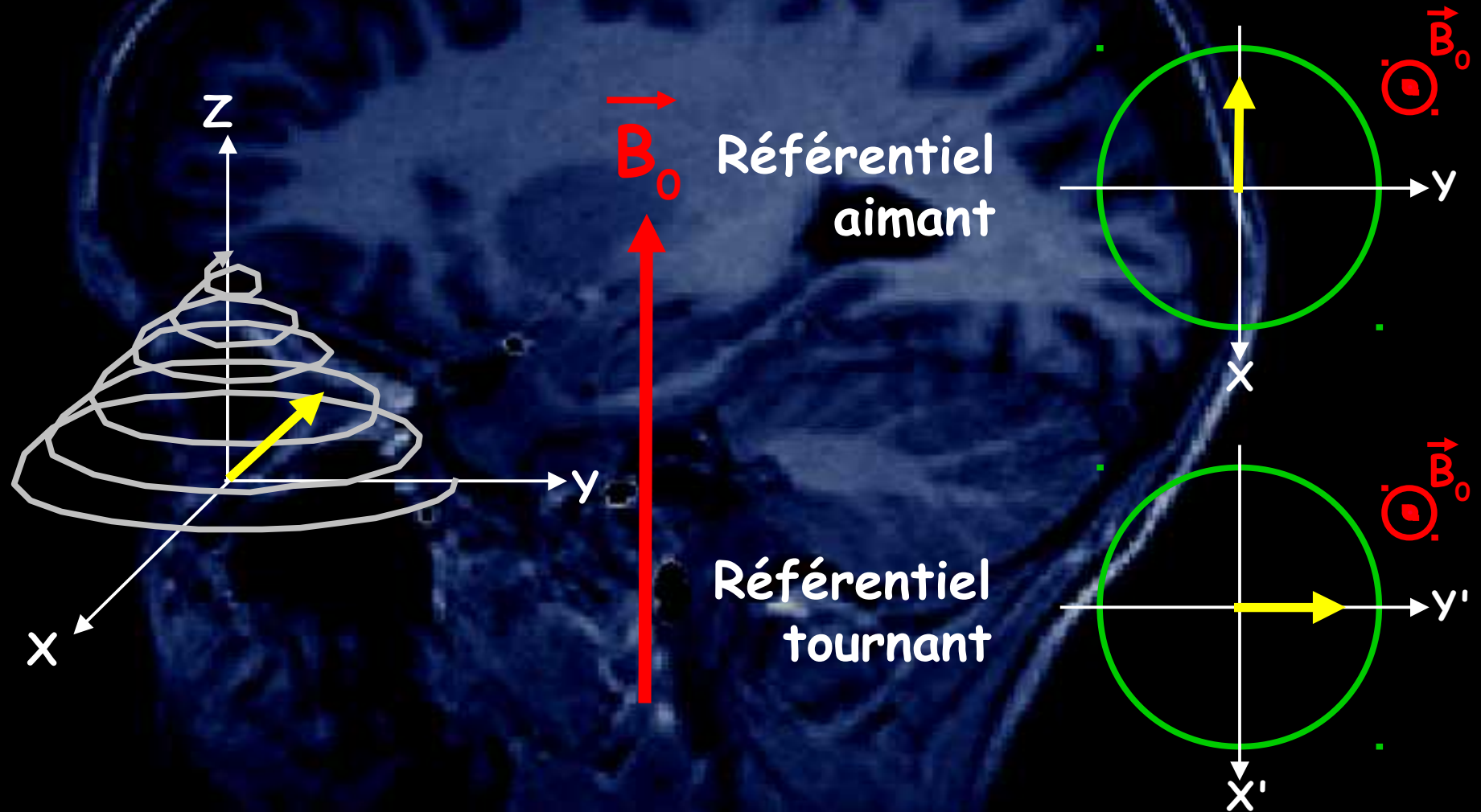
Elle débute lorsque la RF s'arrête et traduit un échange d'énergie avec le milieu.



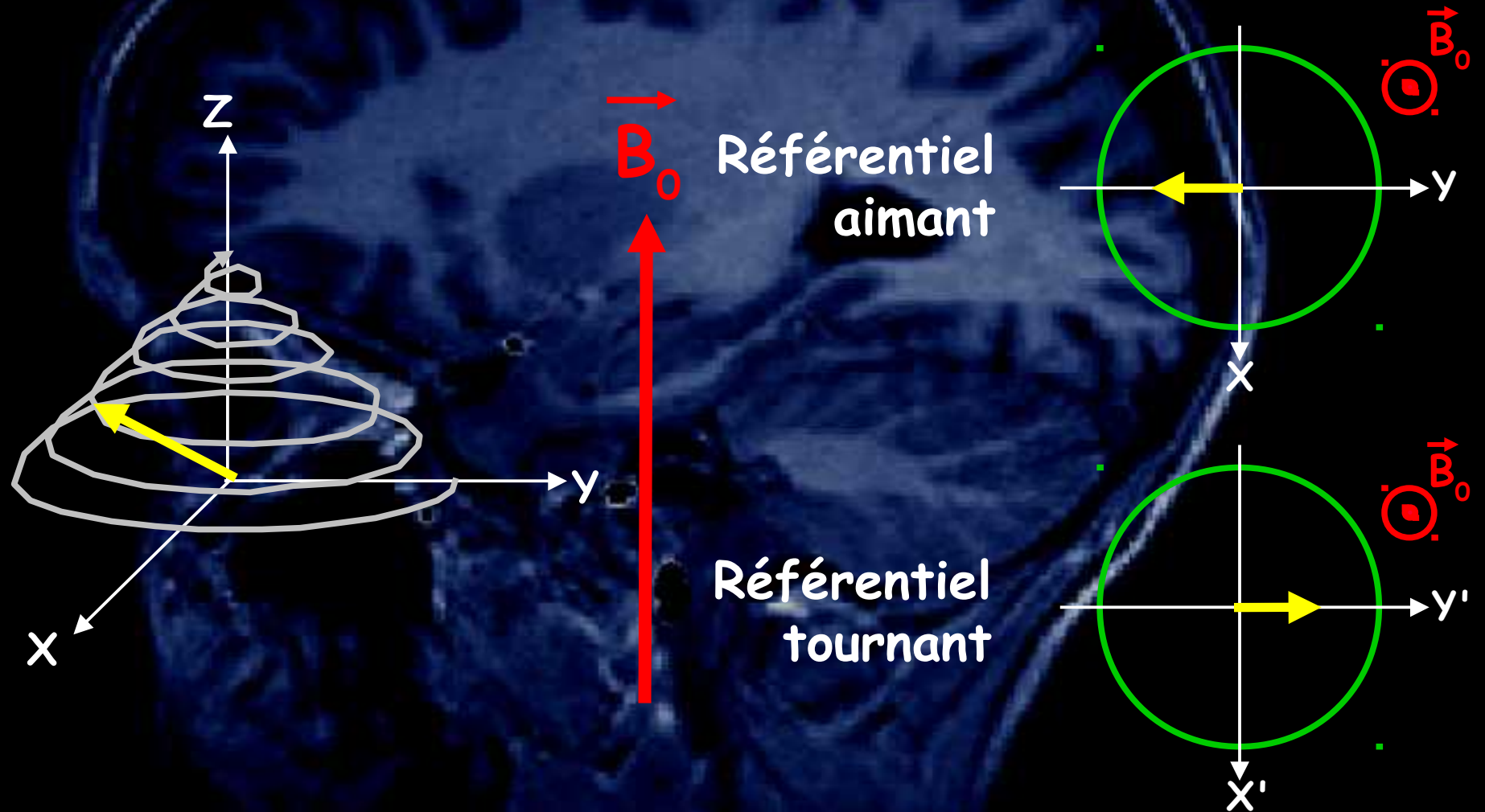
Le référentiel tournant



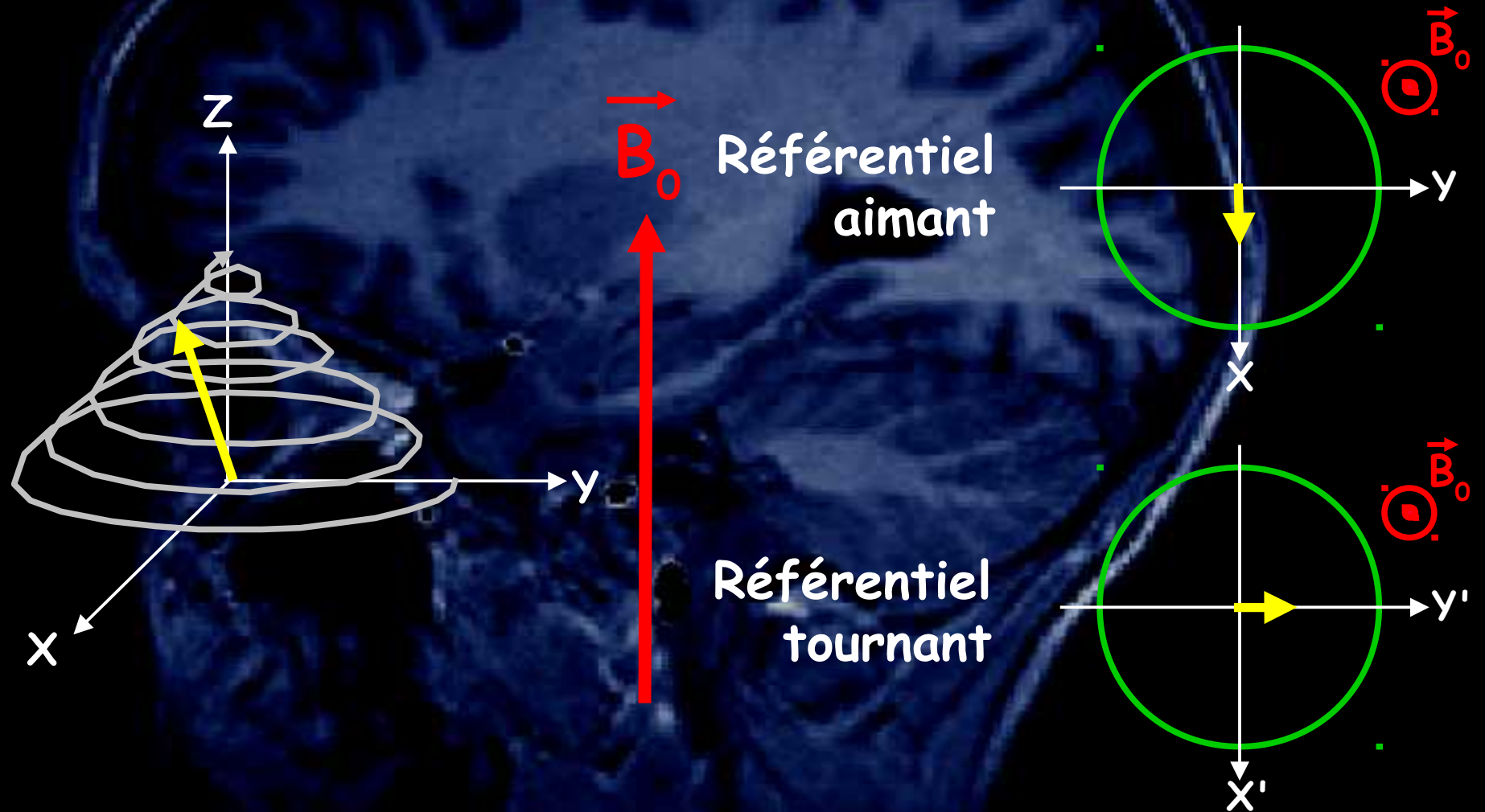
Le référentiel tournant



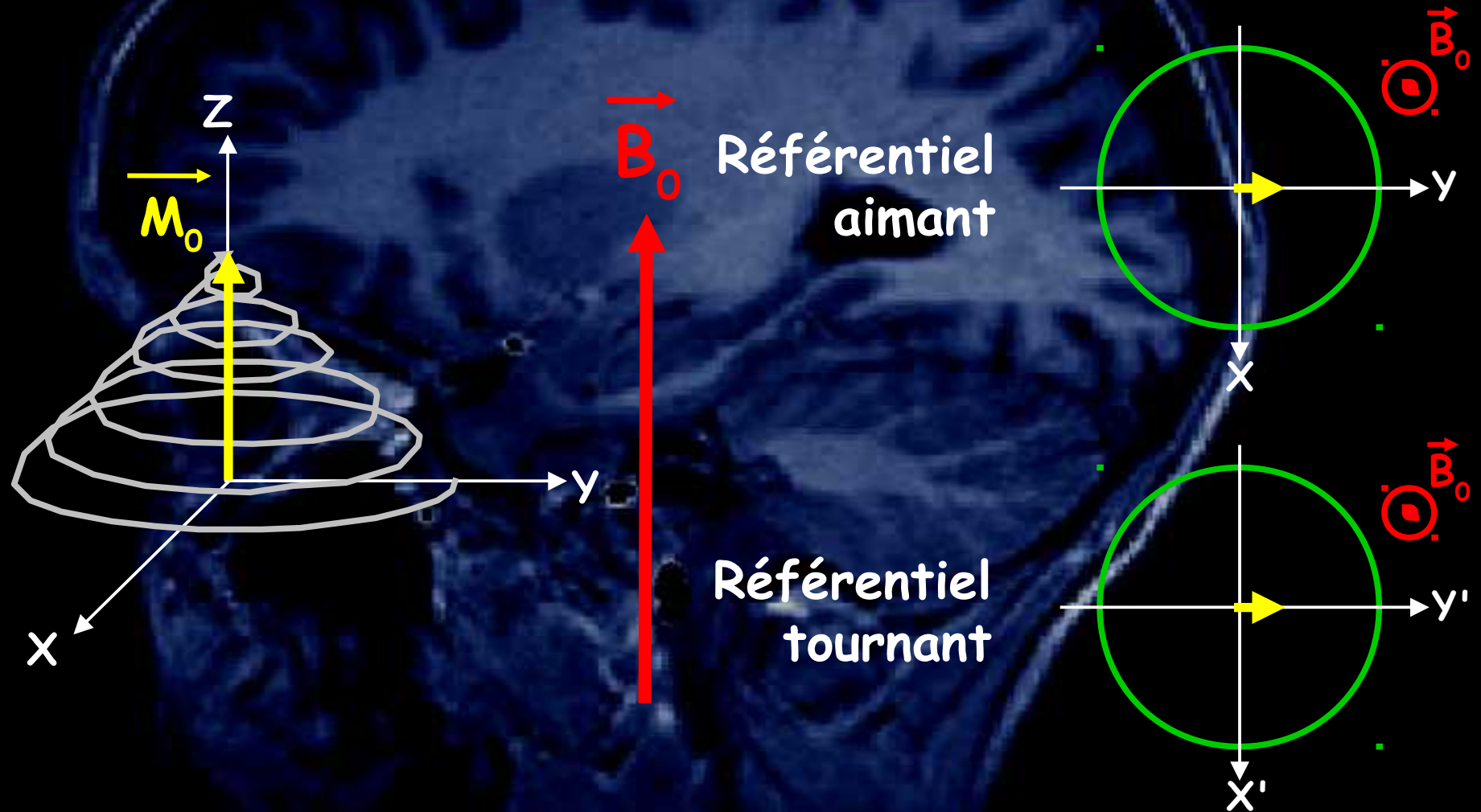
Le référentiel tournant



Le référentiel tournant



Le référentiel tournant

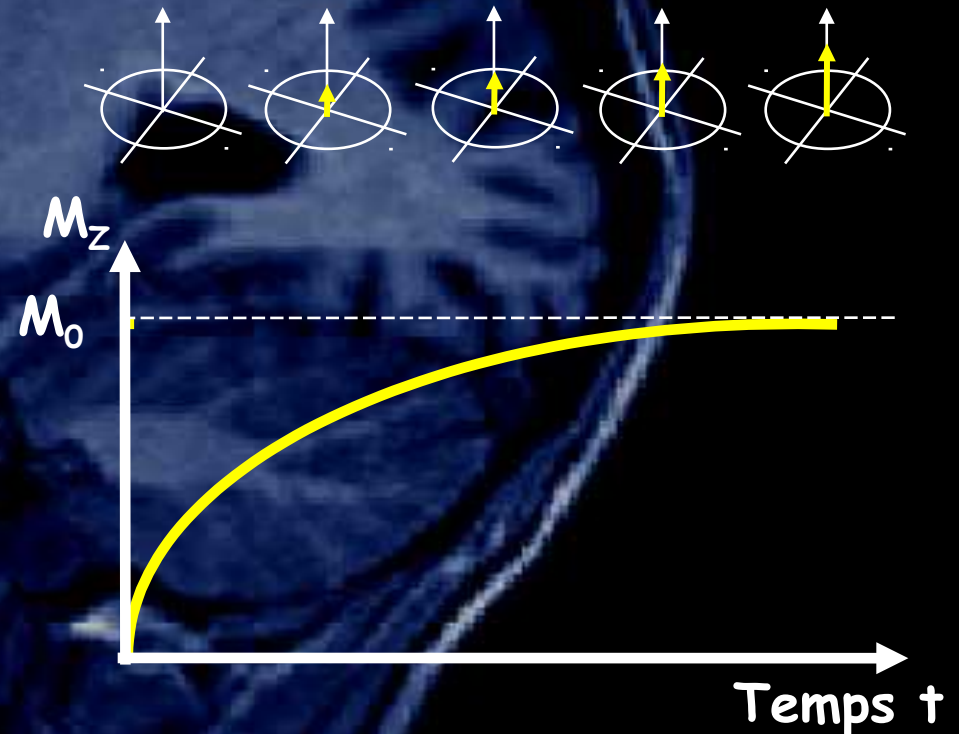


La relaxation longitudinale

La relaxation longitudinale caractérise la repousse de l'aimantation le long de \vec{B}_0 .

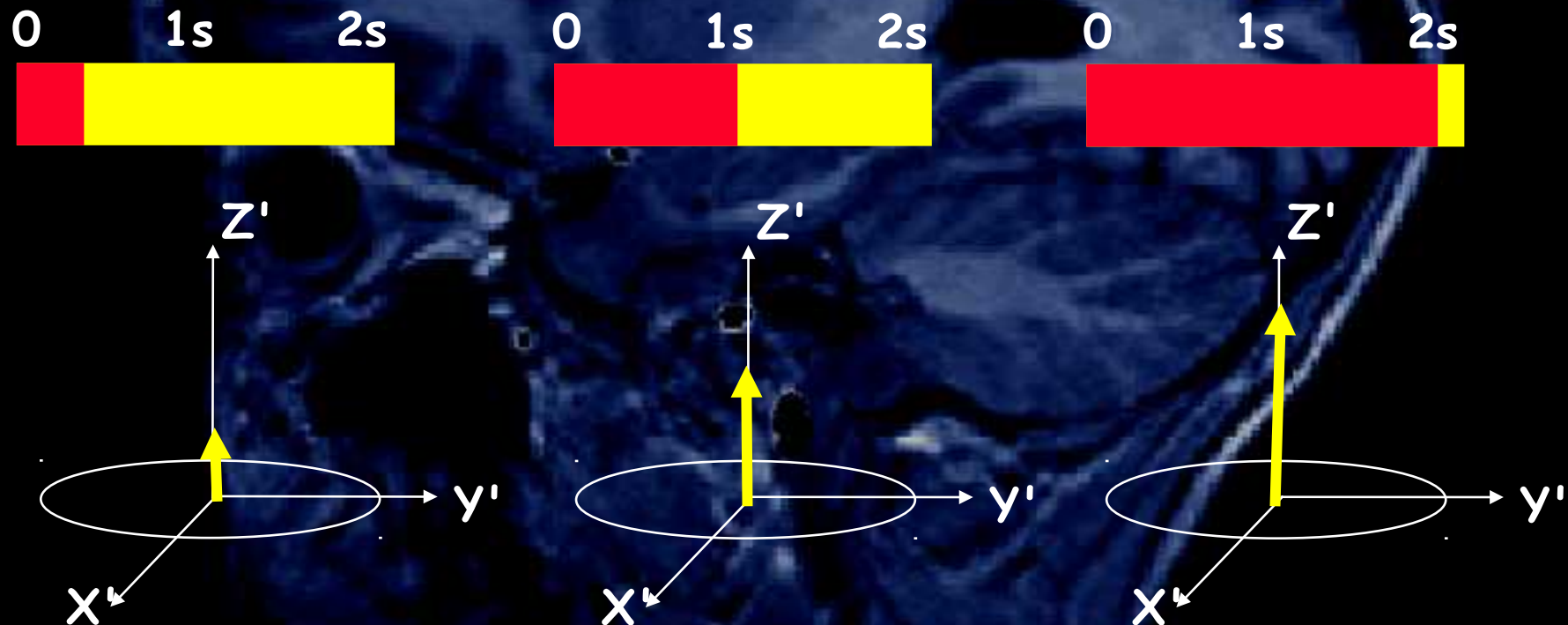
Elle est définie par le temps de relaxation T_1 .

$$M_z = M_0 [1 - \exp (-t/T_1)]$$



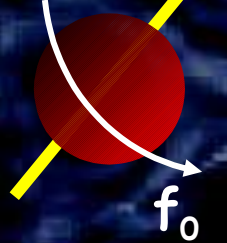
La relaxation longitudinale

Les échanges d'énergie lents entre le système de spins et le milieu constituent ce premier mécanisme de relaxation.

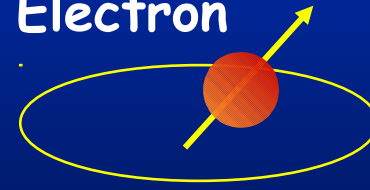


A l'échelle moléculaire

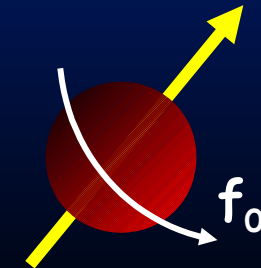
Proton excité



Electron



Paramagnétisme
électronique



Dipôle - dipôle

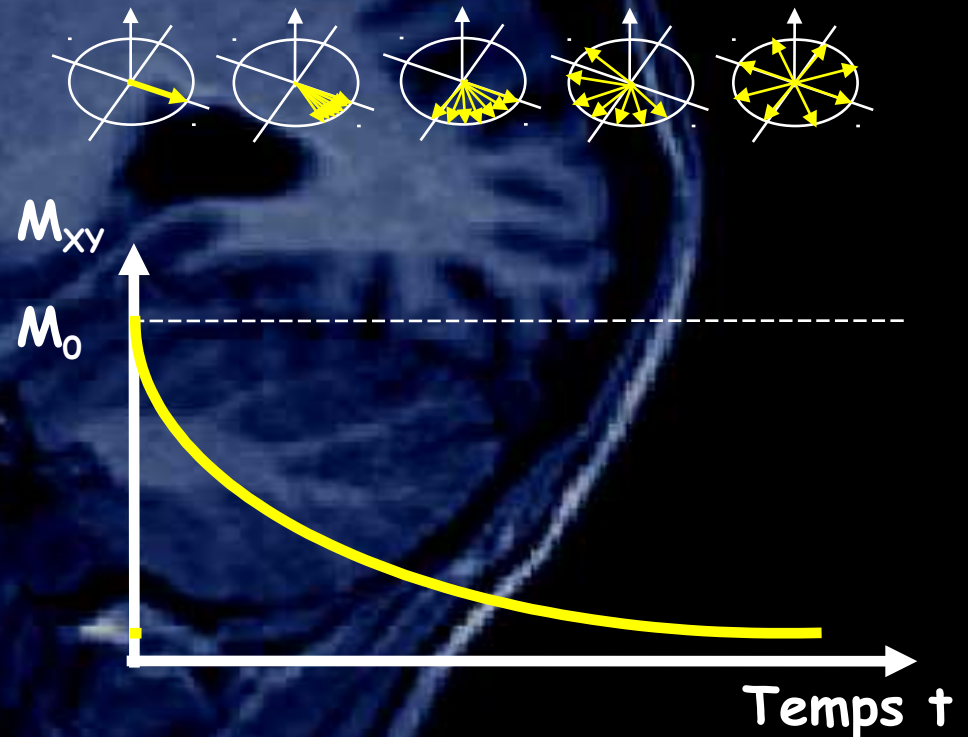
Interactions avec le milieu

La relaxation transverse

La relaxation transverse caractérise la décroissance de l'aimantation transverse.

Elle est définie par le temps de relaxation T_2 .

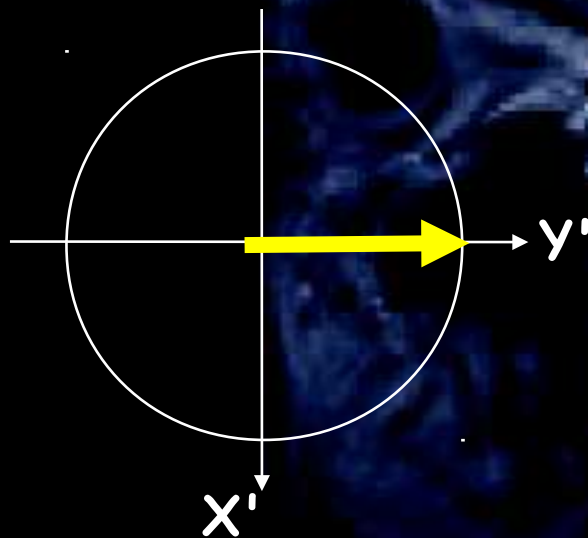
$$M_{xy} = M_0 \exp(-t/T_2)$$



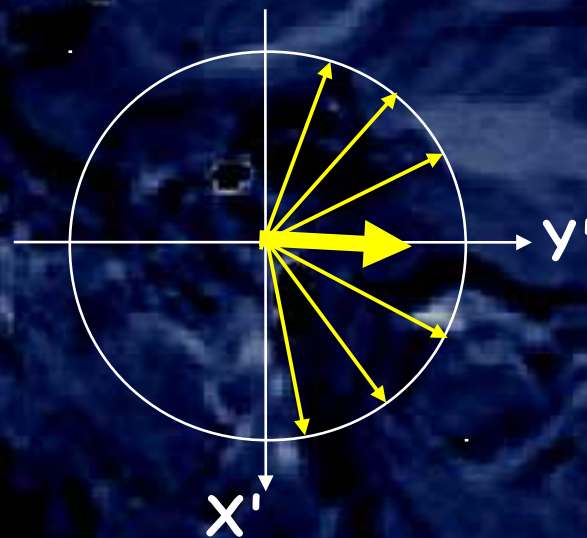
La relaxation transverse

Les échanges d'énergie à l'intérieur du système de spins constituent ce second mécanisme de relaxation.

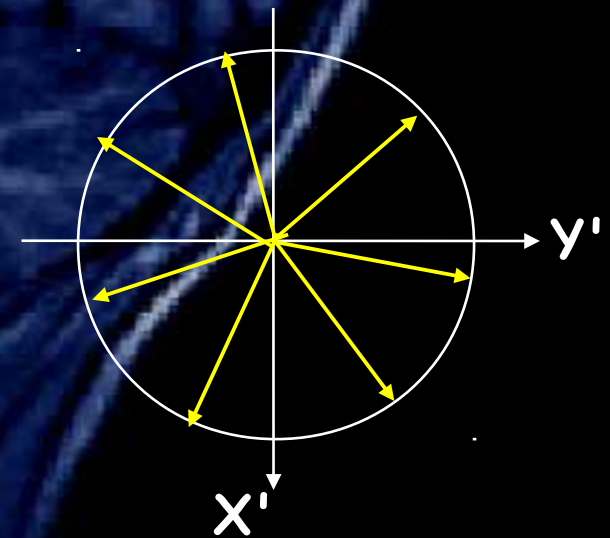
0 50ms 100ms



0 50ms 100ms

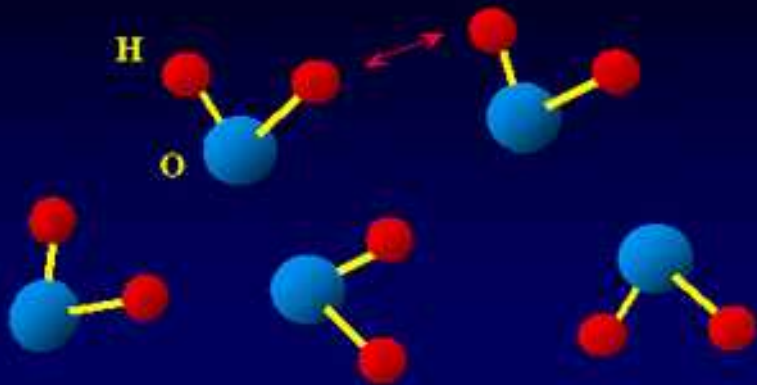


0 50ms 100ms

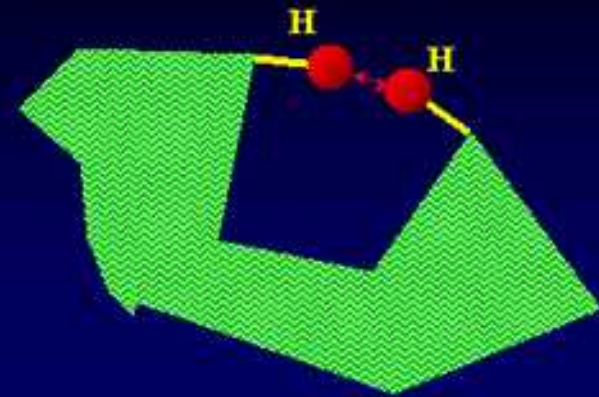


A l'échelle moléculaire

Exemple de l'eau: le T2 est long



Exemple d'une grosse molécule rigide: le T2 est court



La relaxation transverse T_2^*

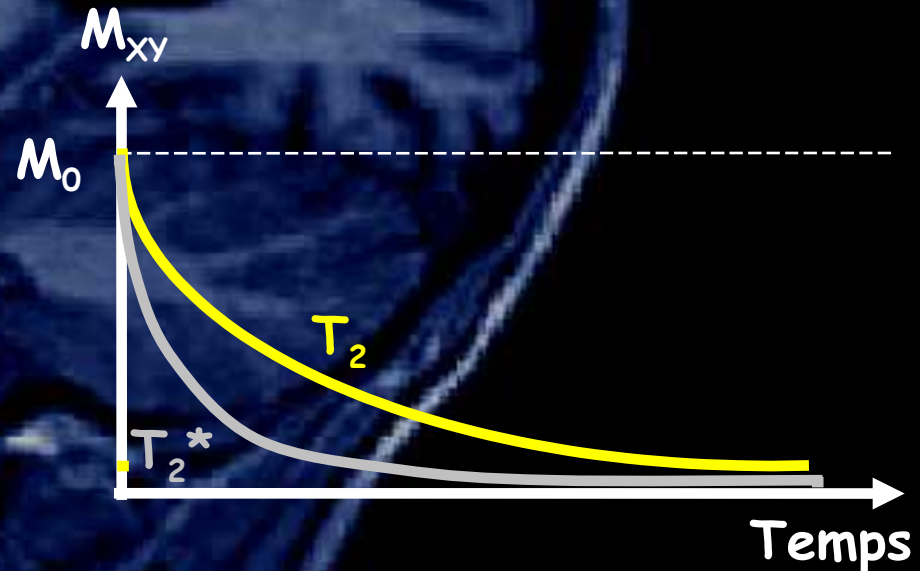
S'il existe des inhomogénéités de champ dans l'échantillon, les spins ne vont pas précesser à la même fréquence f_0 .

➔ Déphasage supplémentaire

La décroissance de l'aimantation transverse est alors plus rapide :

$$\frac{1}{T_2^*} = \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_2'}$$

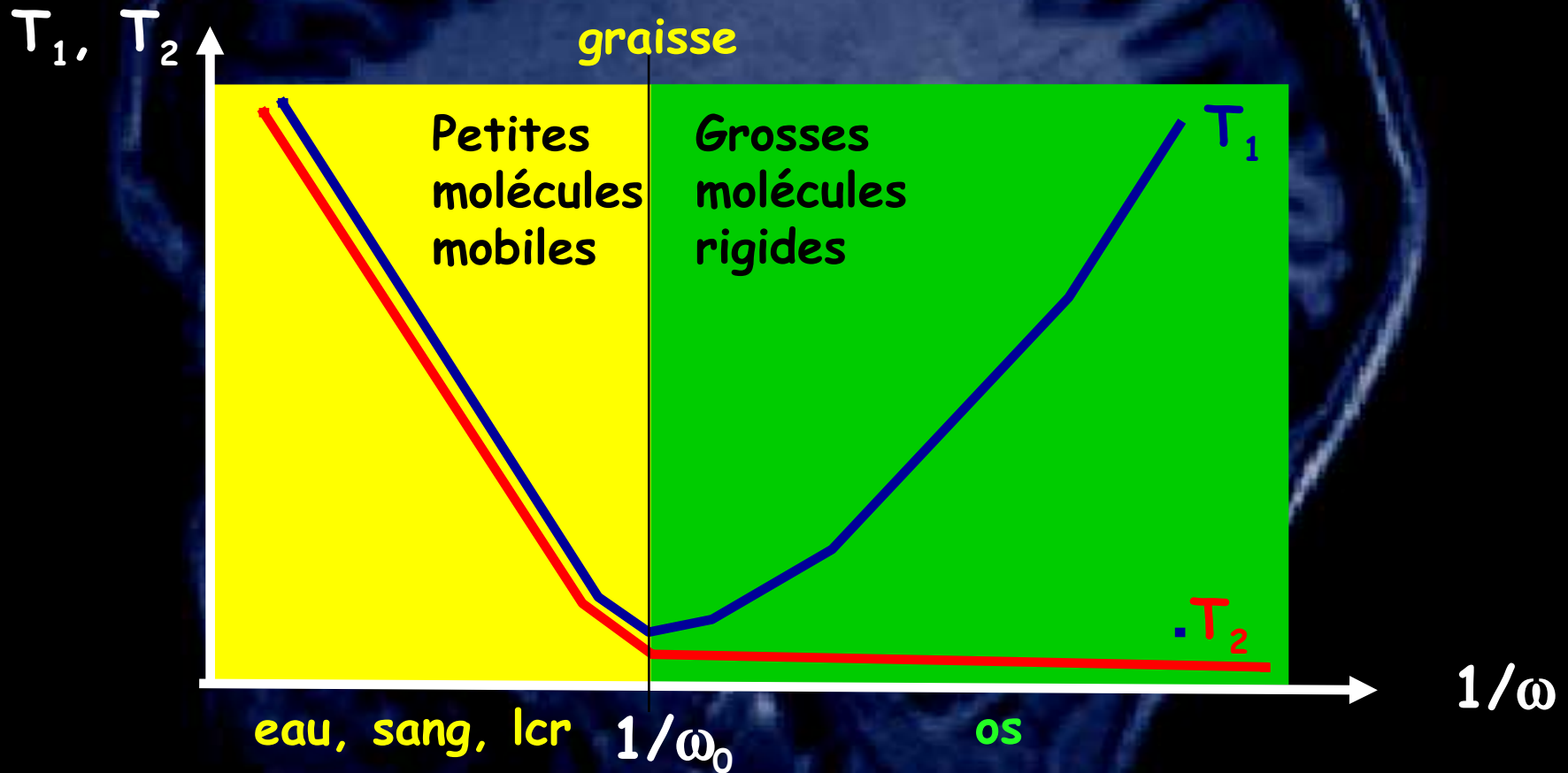
où T_2' caractérise la relaxation transverse liée aux inhomogénéités de champ.



Les temps de relaxation

3T / 1,5T	MB	MG	LCR
DP	0,65	0,75	1,0
T1	832 ± 10 ms 756 ms	1331 ± 13 ms 1200 ms	4300 ms
T2	79,6 ± 0,6 ms	110 ± 2 ms	
T2*	44,7 - 48,4 ms	51,8 - 41,6 ms	

Evolution de T_1 et T_2 à l'échelle moléculaire



Les propriétés magnétiques des particules

La polarisation

La résonance

La relaxation

La lecture du signal

Notions d'électromagnétisme

Un aimant tournant à proximité d'une antenne génère un courant électrique dans celle-ci.

S N



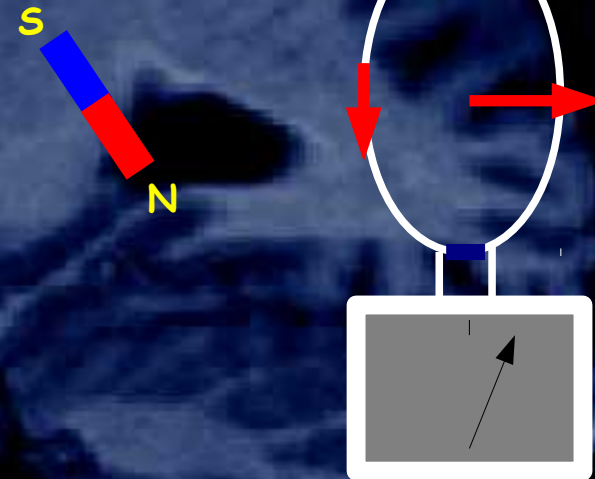
Signal RMN



Temps

Notions d'électromagnétisme

Un aimant tournant à proximité d'une antenne génère un courant électrique dans celle-ci.



Notions d'électromagnétisme

Un aimant tournant à proximité d'une antenne génère un courant électrique dans celle-ci.

S
N

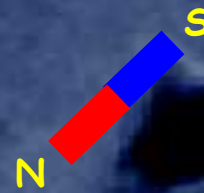


Signal RMN



Notions d'électromagnétisme

Un aimant tournant à proximité d'une antenne génère un courant électrique dans celle-ci.



Signal RMN



Notions d'électromagnétisme

Un aimant tournant à proximité d'une antenne génère un courant électrique dans celle-ci.

N S

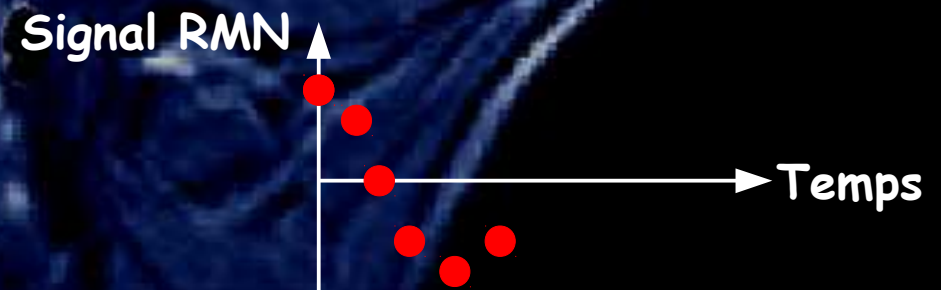
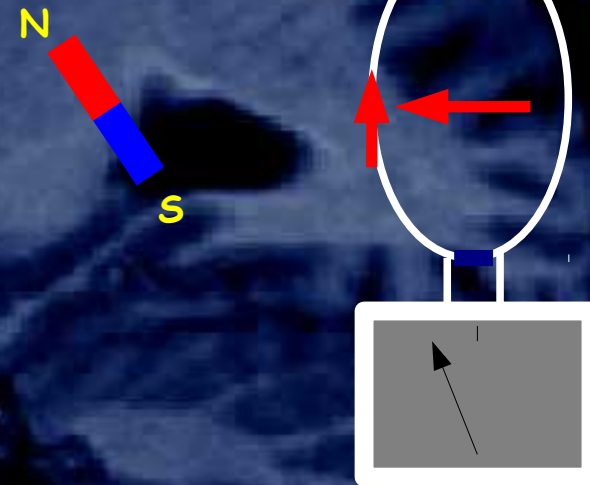


Signal RMN



Notions d'électromagnétisme

Un aimant tournant à proximité d'une antenne génère un courant électrique dans celle-ci.



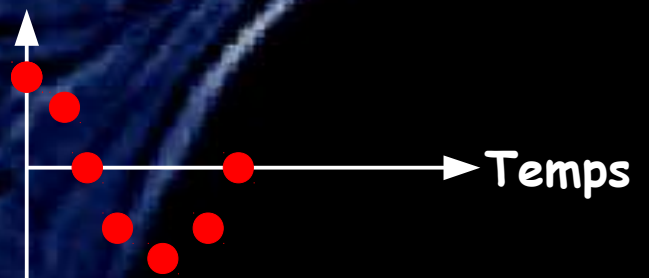
Notions d'électromagnétisme

Un aimant tournant à proximité d'une antenne génère un courant électrique dans celle-ci.

N
S



Signal RMN

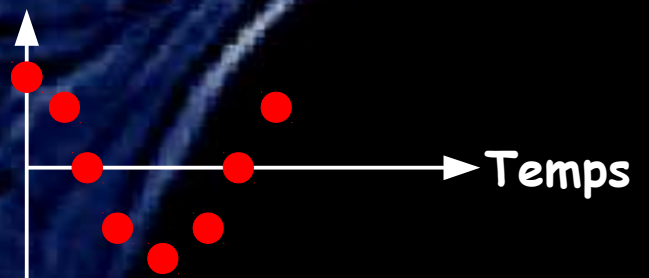


Notions d'électromagnétisme

Un aimant tournant à proximité d'une antenne génère un courant électrique dans celle-ci.



Signal RMN



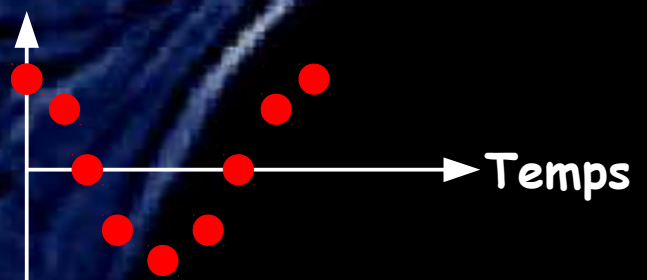
Notions d'électromagnétisme

Un aimant tournant à proximité d'une antenne génère un courant électrique dans celle-ci.

S N



Signal RMN



Notions d'électromagnétisme

Loi de Lenz

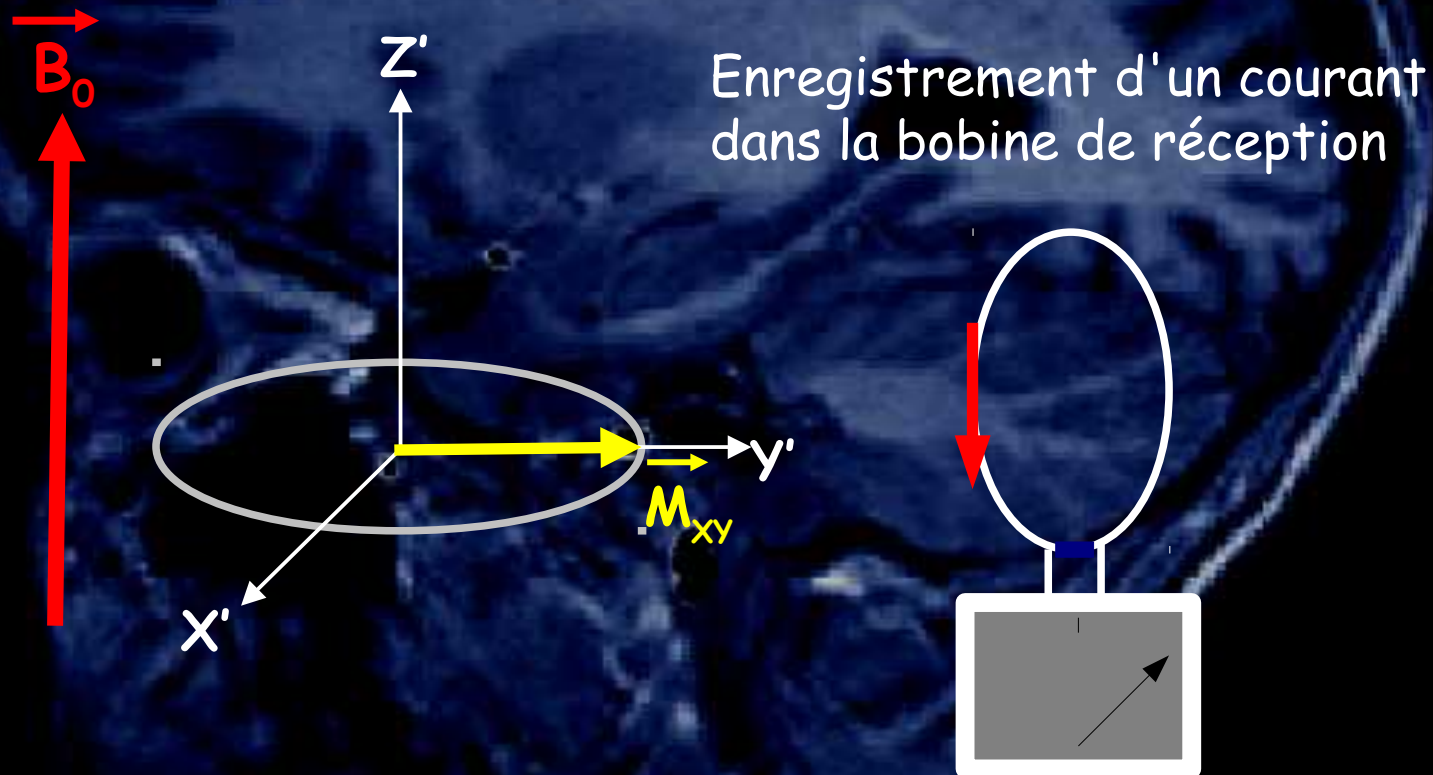
Un circuit soumis à un flux magnétique Φ (issu d'un champ magnétique B) variable est le siège d'une force électromotrice f telle que :

$$f = - d\Phi/dt$$

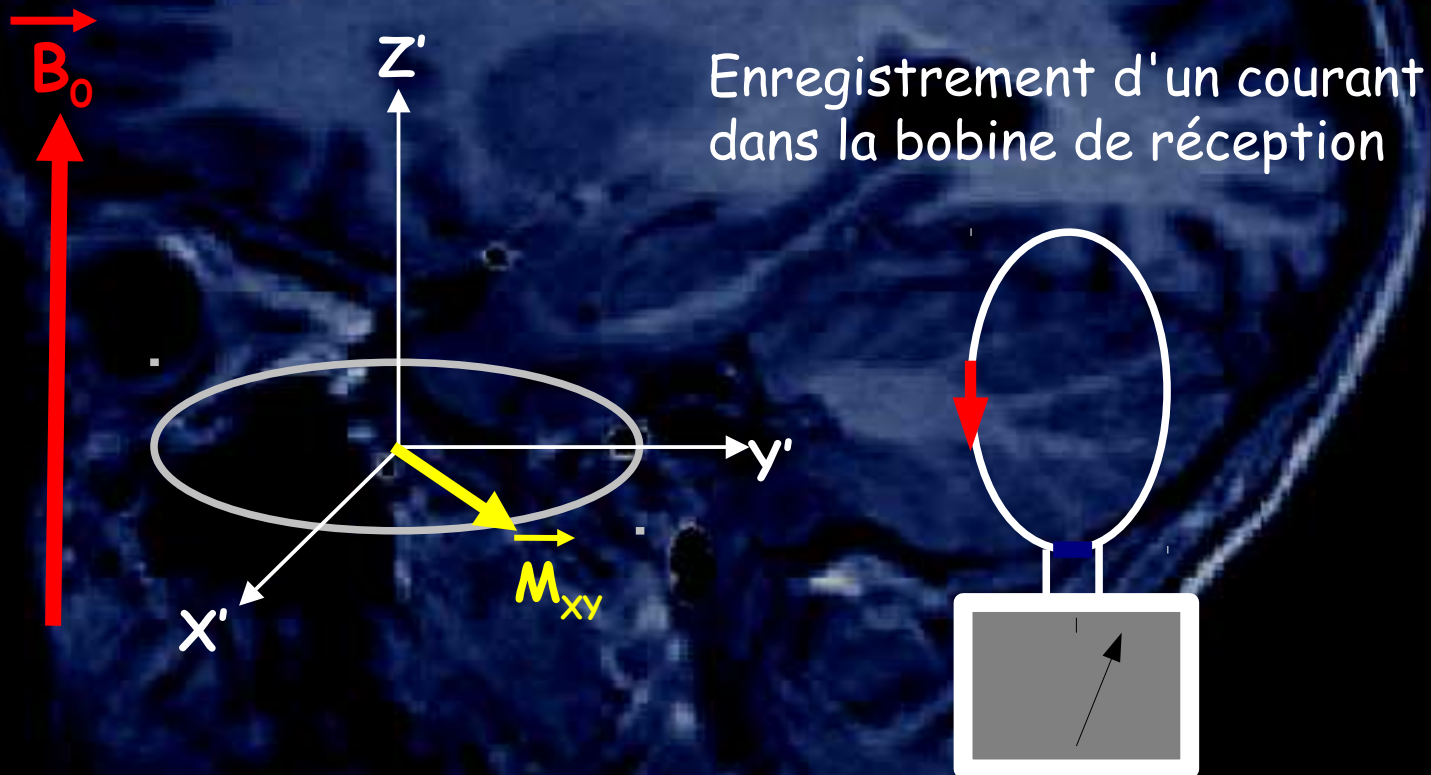
(exemple : freins magnétiques des camions)

Dans l'IRM, éviter les matériaux conducteurs en mouvement

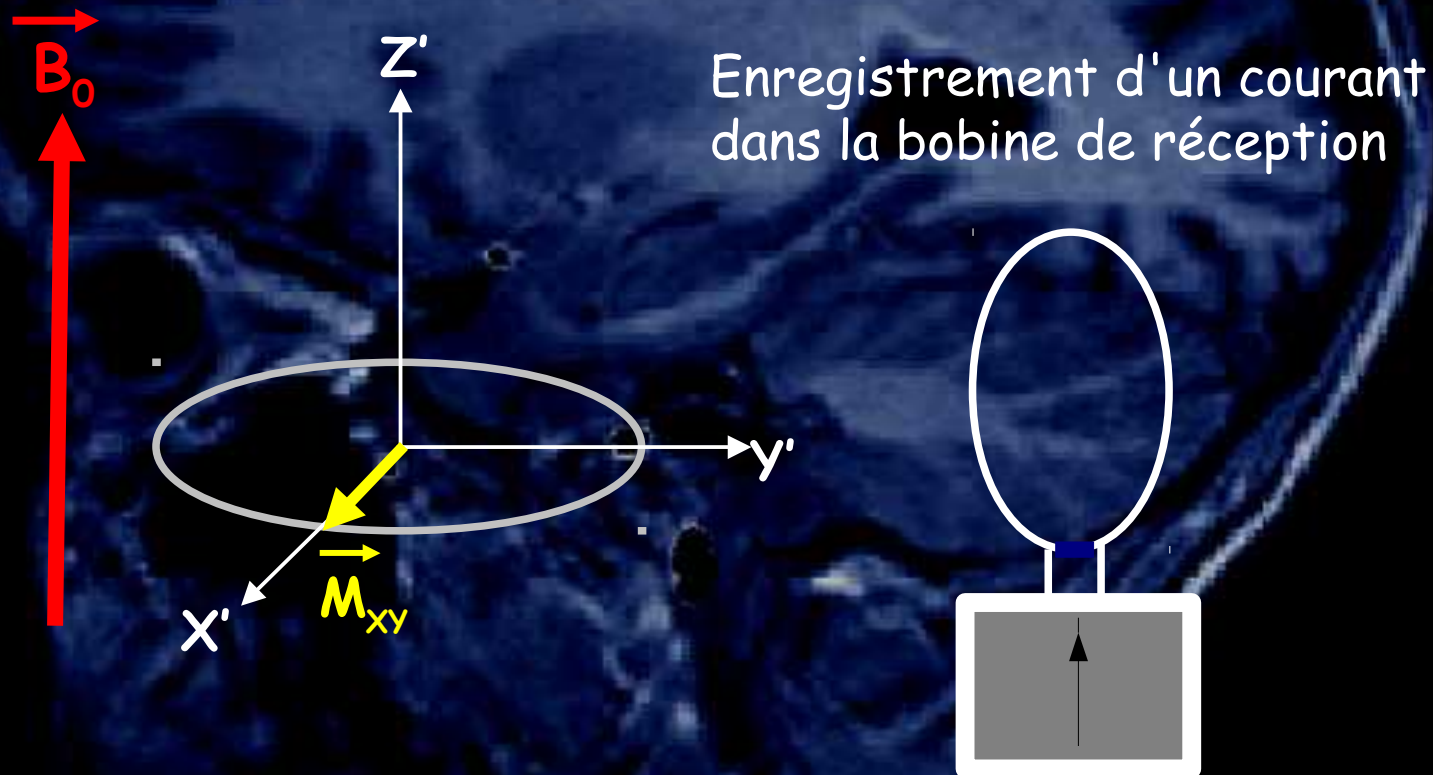
Lorsque la RF s'arrête, la relaxation de l'aimantation transverse induit un courant électrique dans une antenne de réception placée à proximité de l'échantillon.



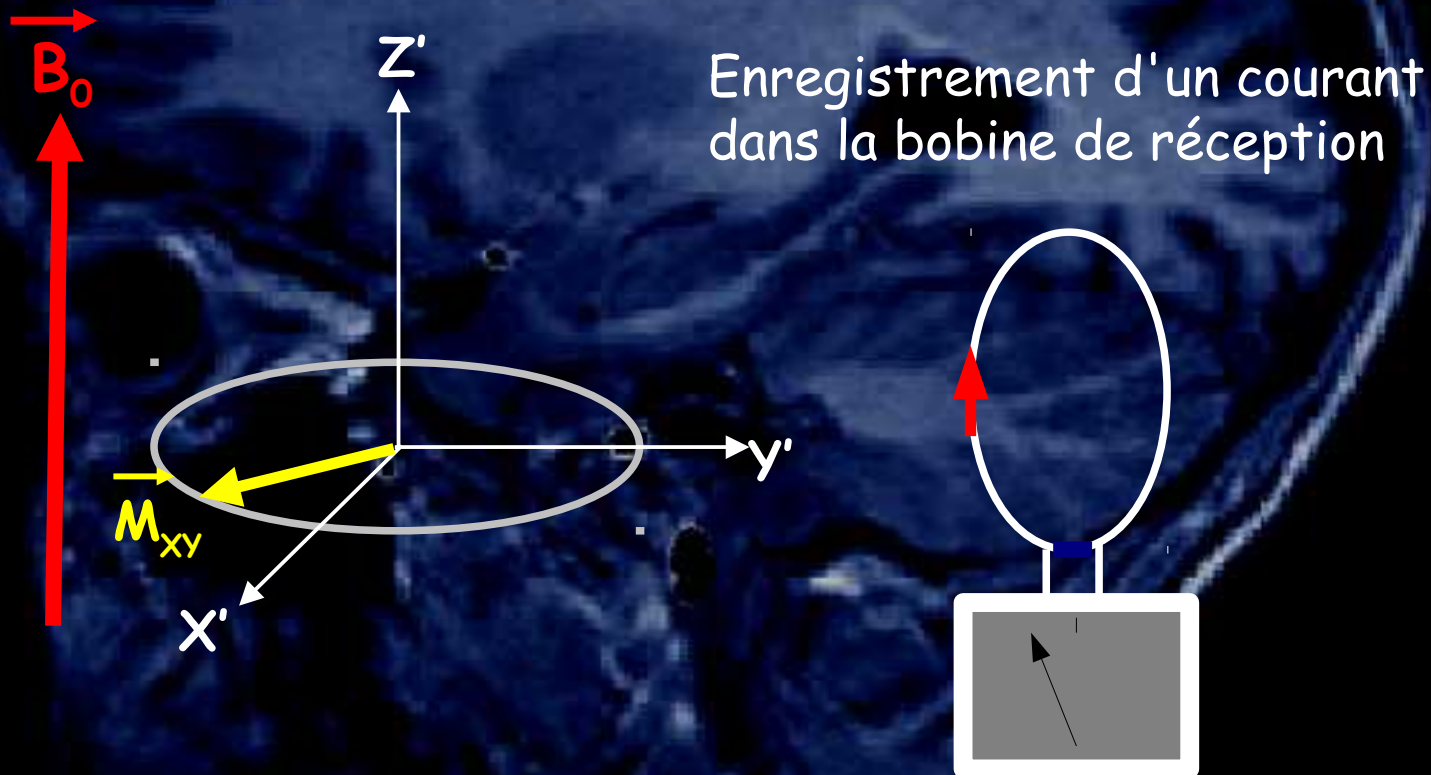
Lorsque la RF s'arrête, la relaxation de l'aimantation transverse induit un courant électrique dans une antenne de réception placée à proximité de l'échantillon.



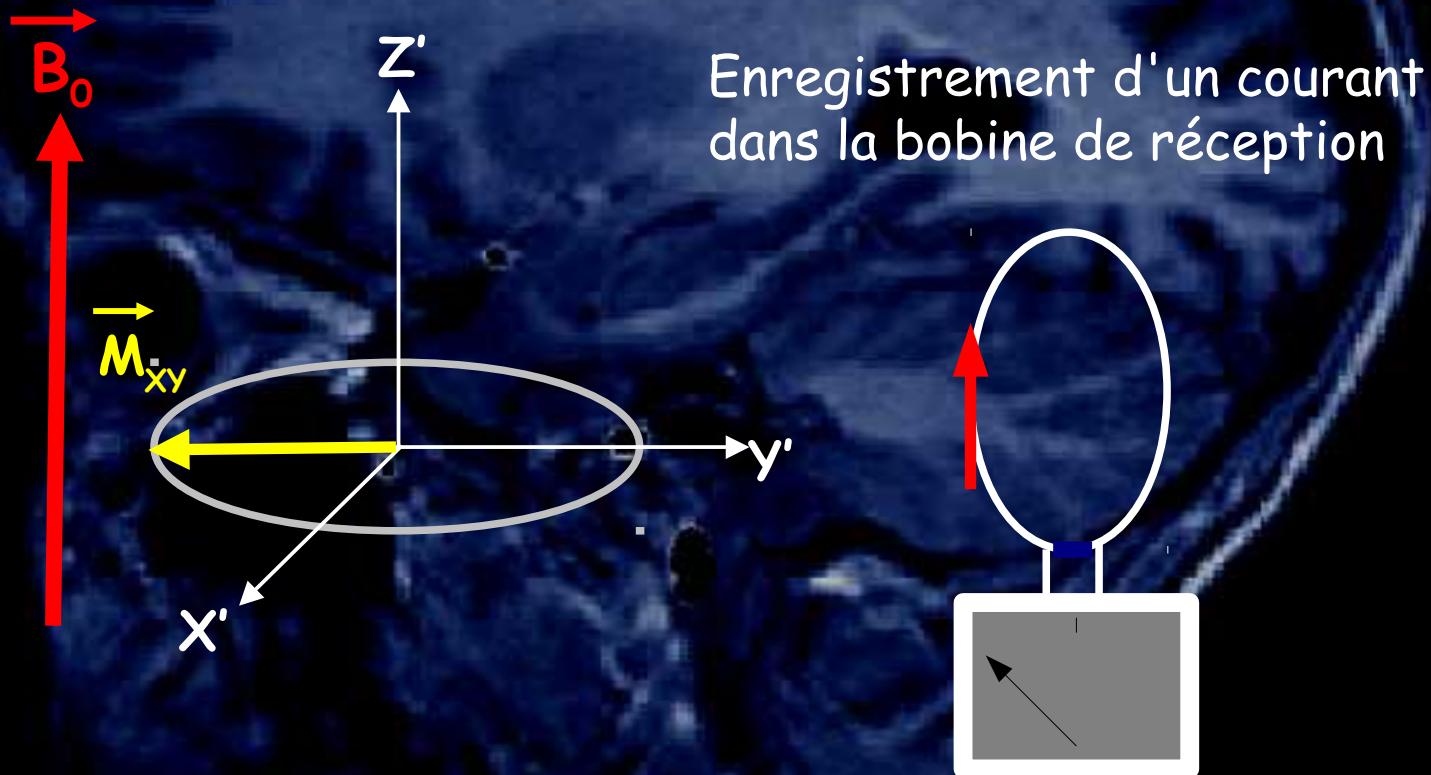
Lorsque la RF s'arrête, la relaxation de l'aimantation transverse induit un courant électrique dans une antenne de réception placée à proximité de l'échantillon.



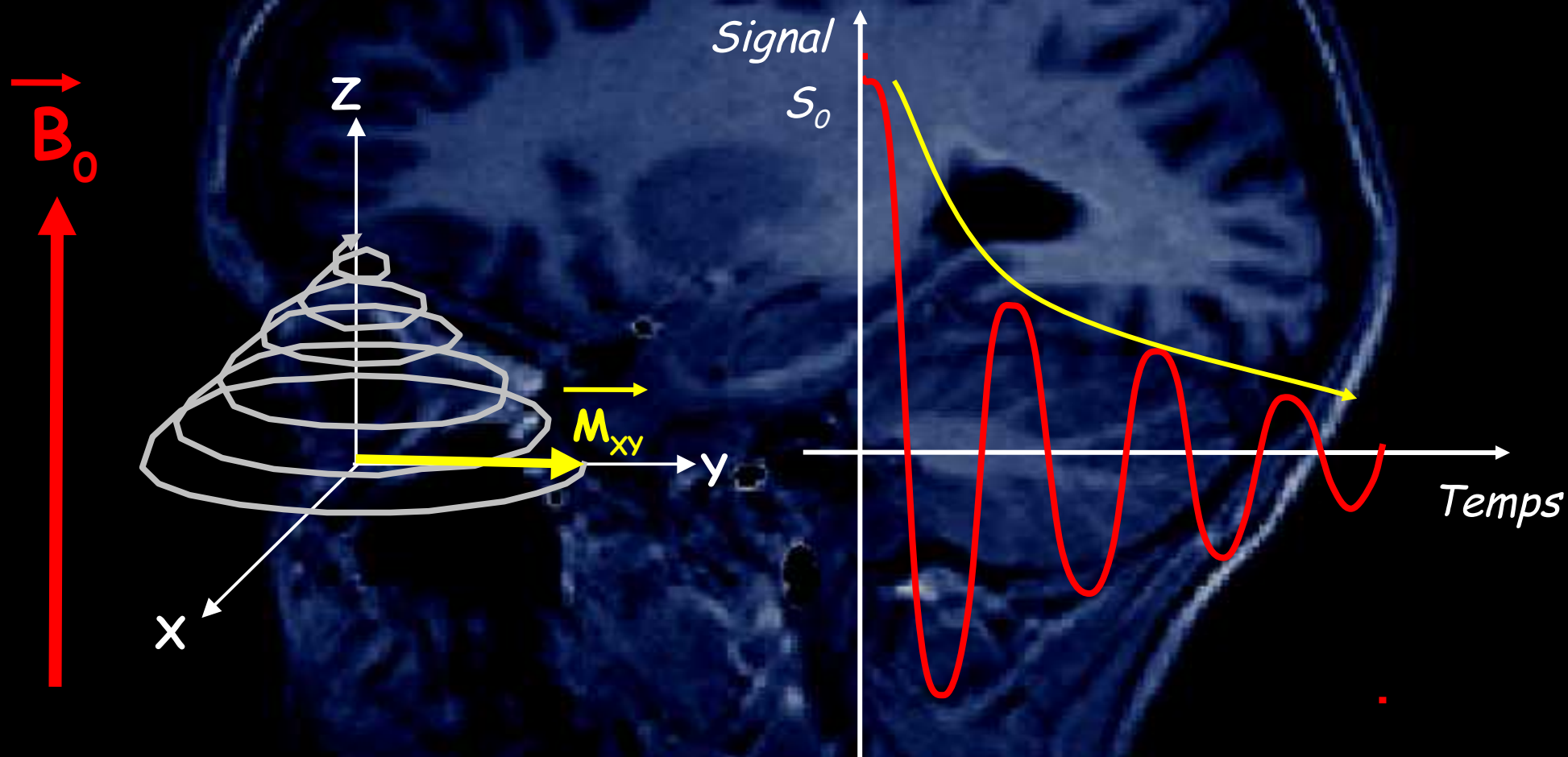
Lorsque la RF s'arrête, la relaxation de l'aimantation transverse induit un courant électrique dans une antenne de réception placée à proximité de l'échantillon.



Lorsque la RF s'arrête, la relaxation de l'aimantation transverse induit un courant électrique dans une antenne de réception placée à proximité de l'échantillon.



Le courant induit en RMN



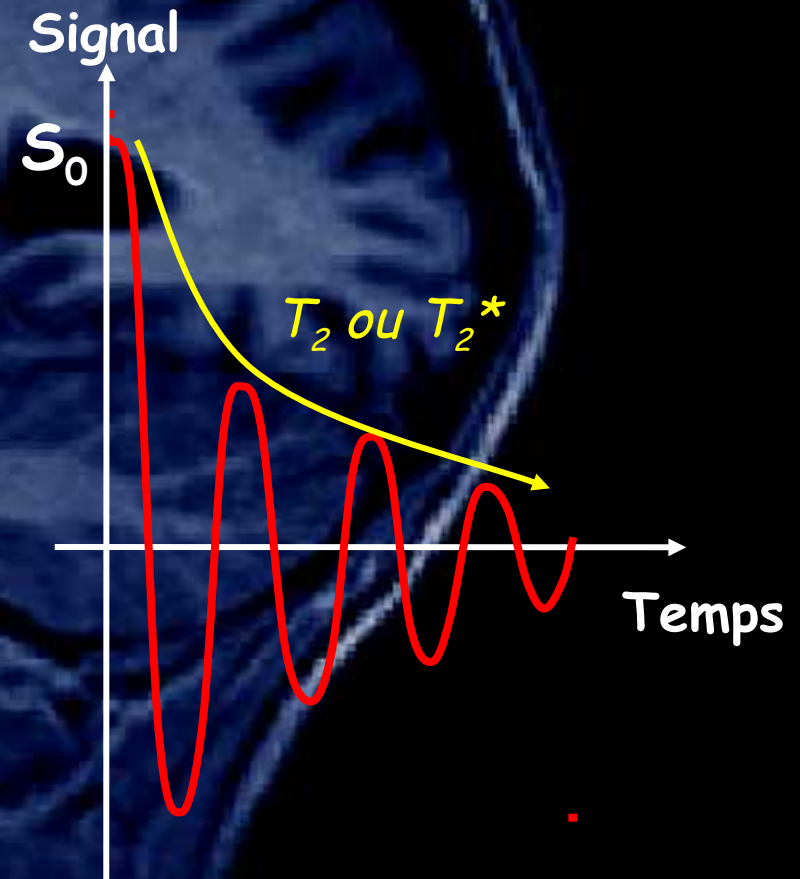
Le signal RMN

Le signal recueilli S est une FID
(Free Induction Decay)

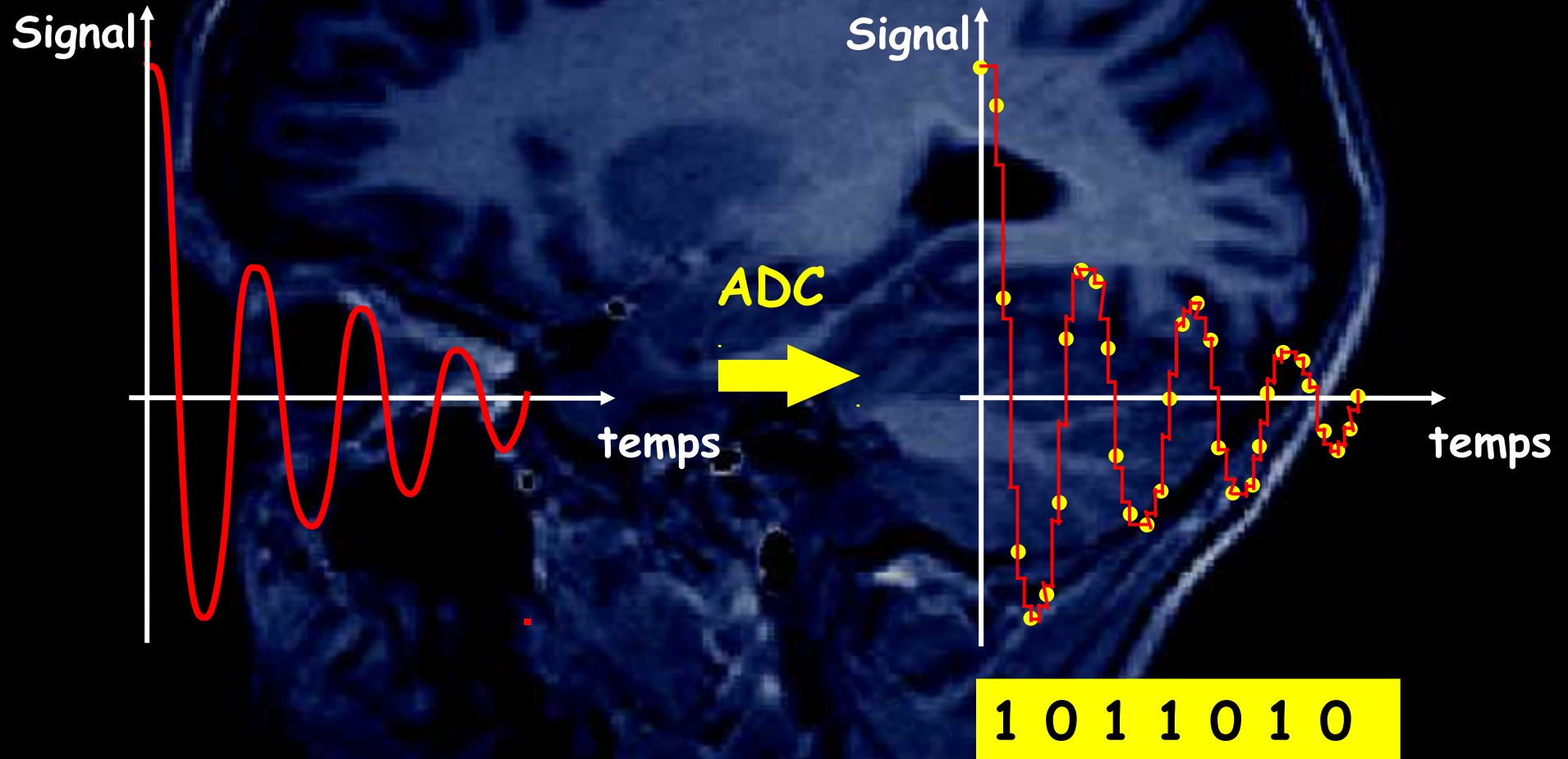
$$S = S_0 \underbrace{\sin(2\pi \cdot f_0 \cdot t)}_{\text{Oscillations à la fréquence } f_0} \underbrace{\exp(-t/T_2)}_{\text{Relaxation transverse}}$$

Oscillations à
la fréquence f_0

Relaxation
transverse



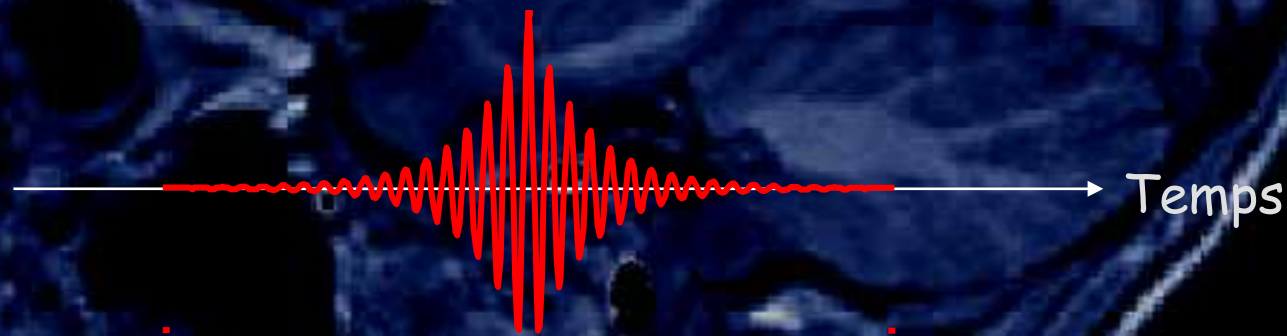
Conversion Analogique-Digital (ADC)



L'acquisition d'un écho

En pratique, le signal de RMN recueilli est un ECHO

(courant dans l'antenne de réception : quelques millivolts)



L'acquisition d'un écho

