

UE 832

Imagerie par Résonance Magnétique

Bases physiques de la Résonance Magnétique Nucléaire

Pauline Lefebvre

Pauline.lefebvre@univ-lorraine.fr

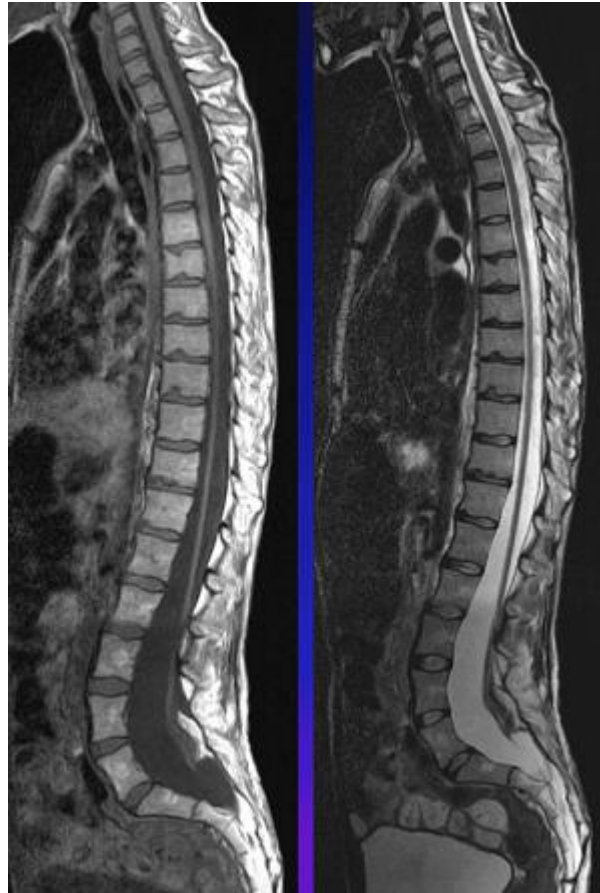
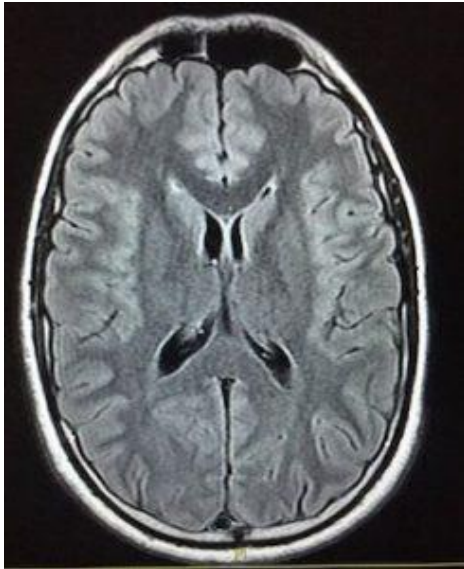
Janvier 2026

[Cours d'IRM \(Imagerie par résonance magnétique\)
en ligne \(imaios.com\)](#)

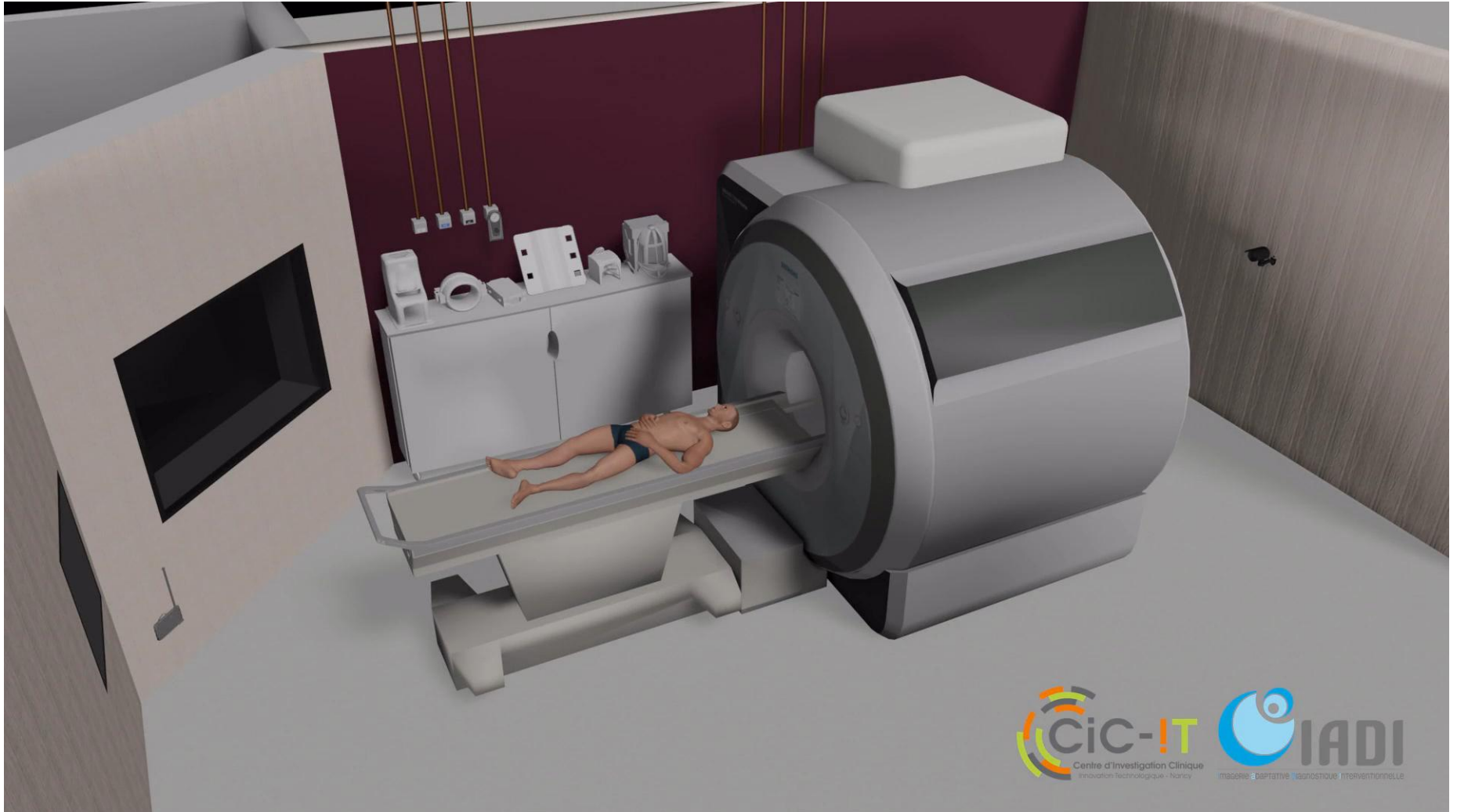
UE 832 : l'IRM

- **3 cours pour appréhender les concepts physiques mis en jeu + le hardware en IRM**
- **1 TD pour les illustrer**
- **1 TP pour (visiter une plateforme IRM) expérimenter sur un IRM pédagogique + électromagnétisme**
- **Oraux inversés**

Introduction : l'IRM



Introduction : l'IRM



Introduction : l'IRM

Rayons X = mesure de densité // IRM = plusieurs types de contrastes (ou pondération)

Pondération (weighted) T1, T2 ou densité

ρ LCR=1

ρ Substance Grise=0,69

ρ Substance Blanche=0,61

T2 graisse=80ms

T2 LCR=160ms

T2 Sub Grise=77ms

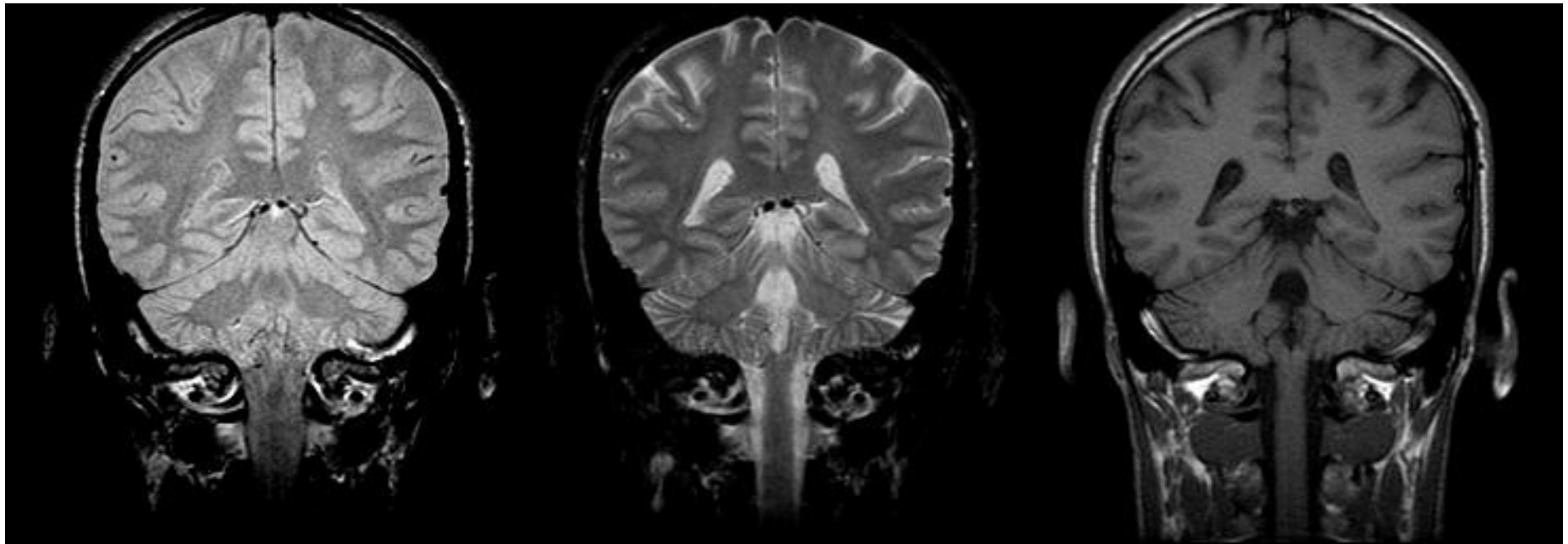
T2 Sub Blanche=67ms

T1graisse=260ms

T1 LCR=2400ms

T1 Sub Grise=760ms

T1 Sub Blanche= 510ms



Pondérée densité

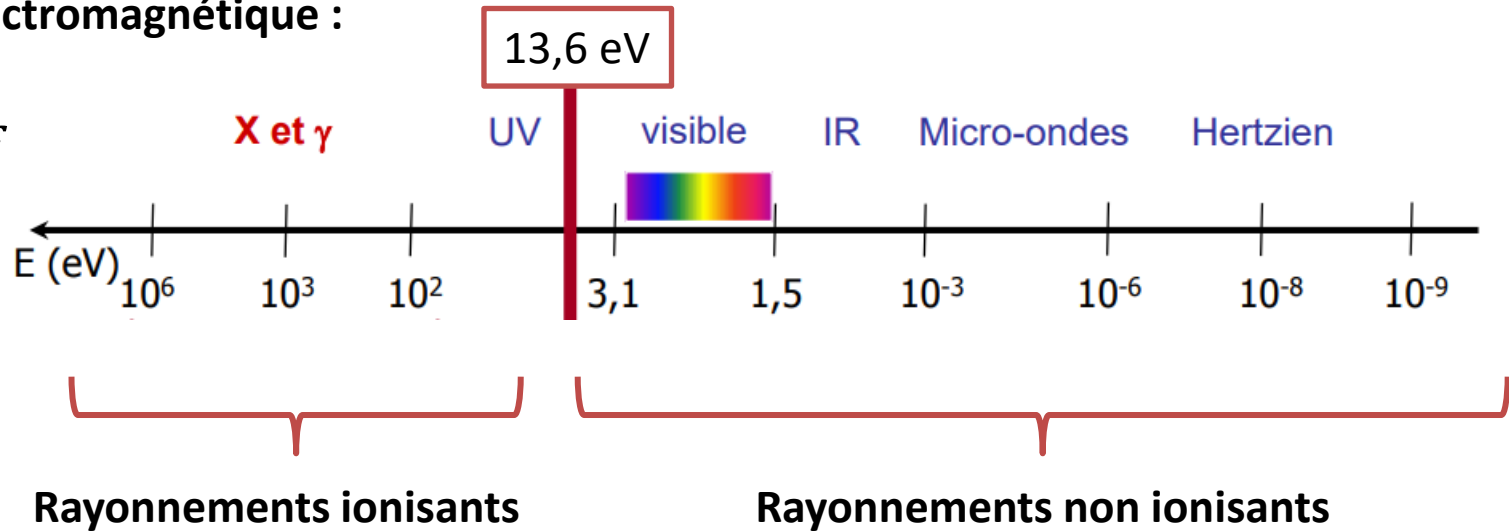
Pondérée T2

Pondérée T1

Introduction : l'IRM

↳ Spectre électromagnétique :

$$E = hf$$



MEDECINE NUCLEAIRE / RADIO /
SCANNER

IRM

IRM très faible énergie électromagnétique
= Radiofréquence (comme téléphone, radiodiffusion,.....)
NON ionisante
Longueur de l'ordre du mètre

Introduction : l'IRM

➤ Principe physique :

- Utilise le principe de la **résonance magnétique nucléaire**
- Composé de :
 - Aimant (en clinique, de 0.5 à 3 T / en recherche, jusqu'à 11 T). *Champ magnétique terrestre : $30\mu T$ à $60\mu T$*
 - Gradients de champ magnétique
 - Antennes d'émission et de réception
 - Grosse électronique pour traiter le signal

➤ Avantages :

- Non-ionisant
- Très bon contraste

➤ Inconvénients :

- Bruyant + claustrophobie
- Restriction d'accès pour certains DM (prothèses, pacemaker ...)
- Cher (1 million € / Tesla)



Introduction : l'IRM

↪ Caractéristiques des images :

- ↪ Résolution de l'ordre du mm
- ↪ Temps d'acquisition dépendant des séquences utilisées (1 à ~20 min)

↪ Applications :

- ↪ Quasiment tous les organes, principalement tous les tissus mous
- ↪ Les tissus contenant peu d'eau, comme l'os ou les poumons, sont moins visibles

↪ Une technique récente ...

- ↪ Début en France en 1980/85
- ↪ Aujourd'hui :
 - 40 000 IRM / monde
 - ~1000 IRM / France



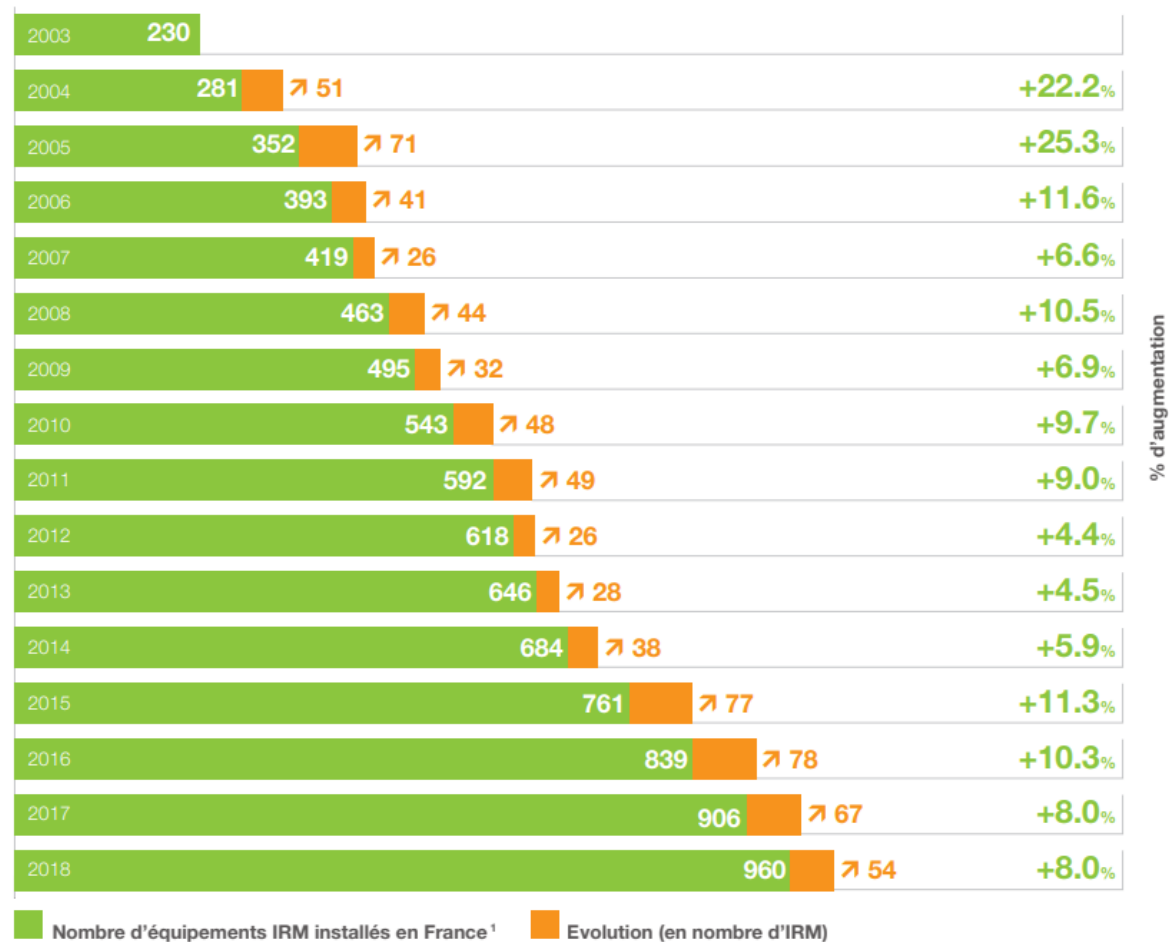
~1980



2016

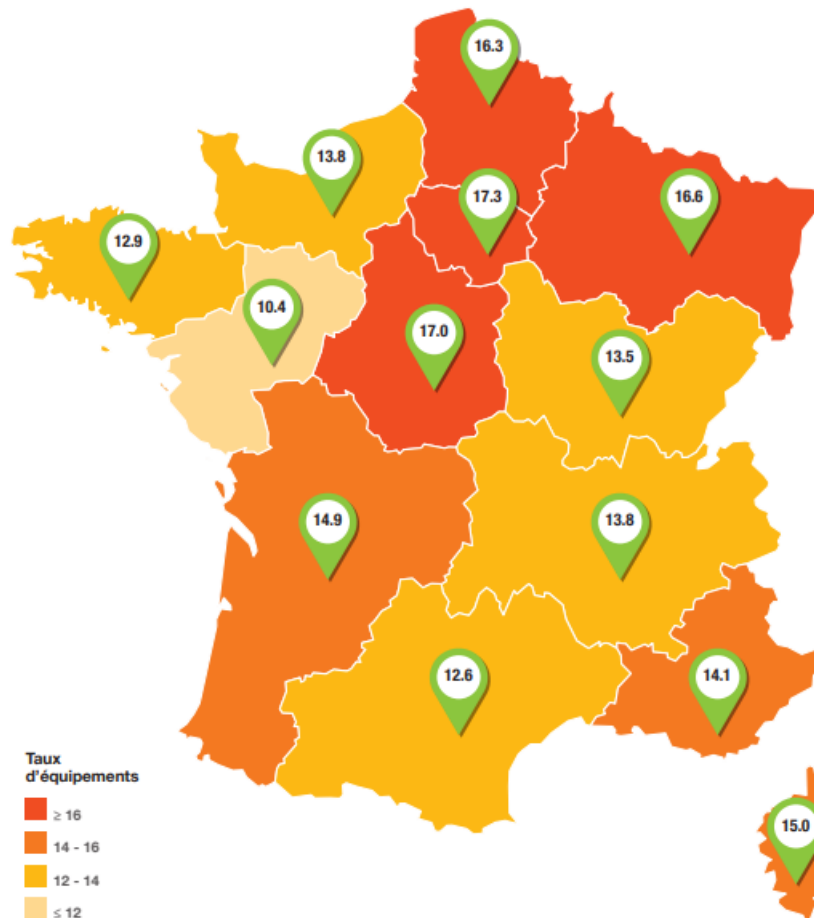
Introduction : l'IRM

Évolution du nombre d'équipements IRM entre 2003 et 2018

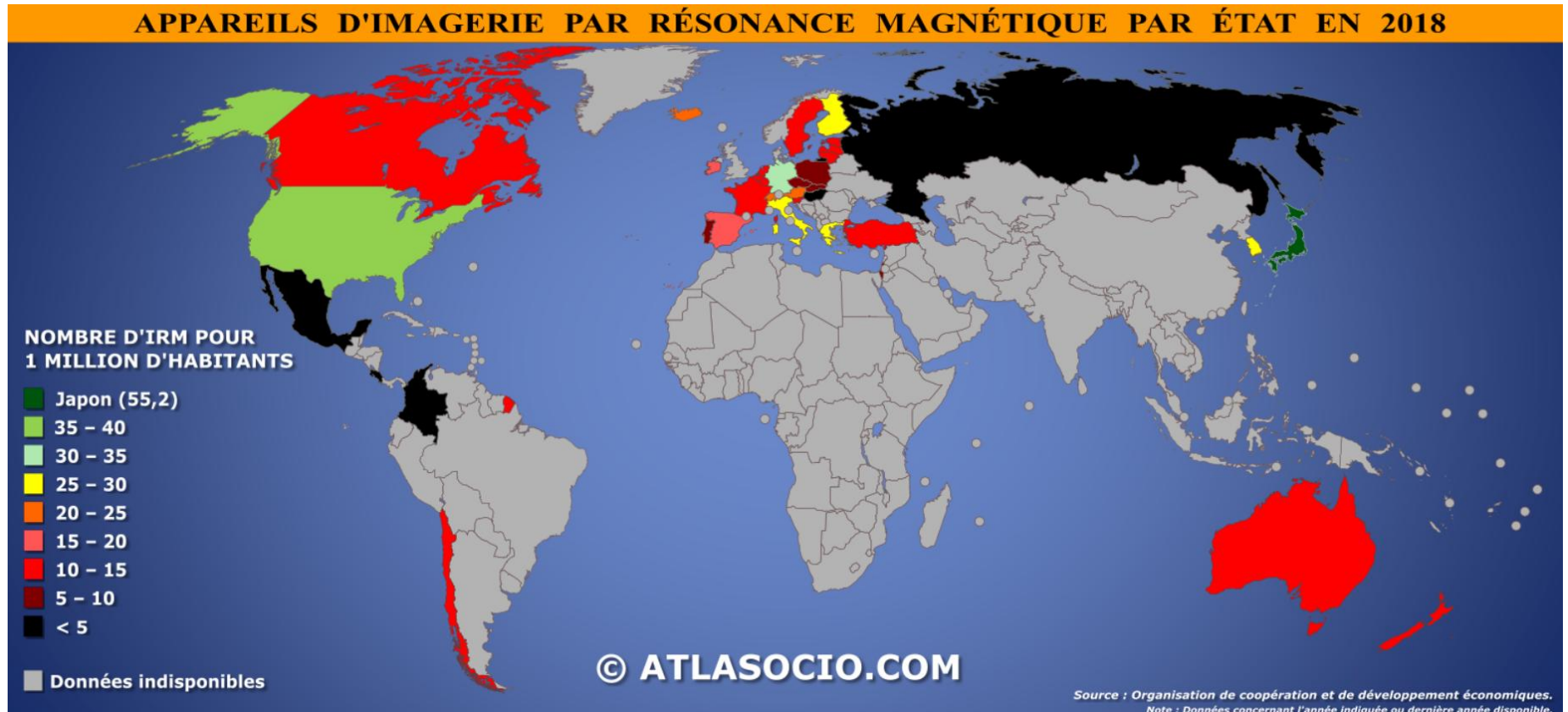


Introduction : l'IRM

Taux d'équipements par région et par million d'habitants

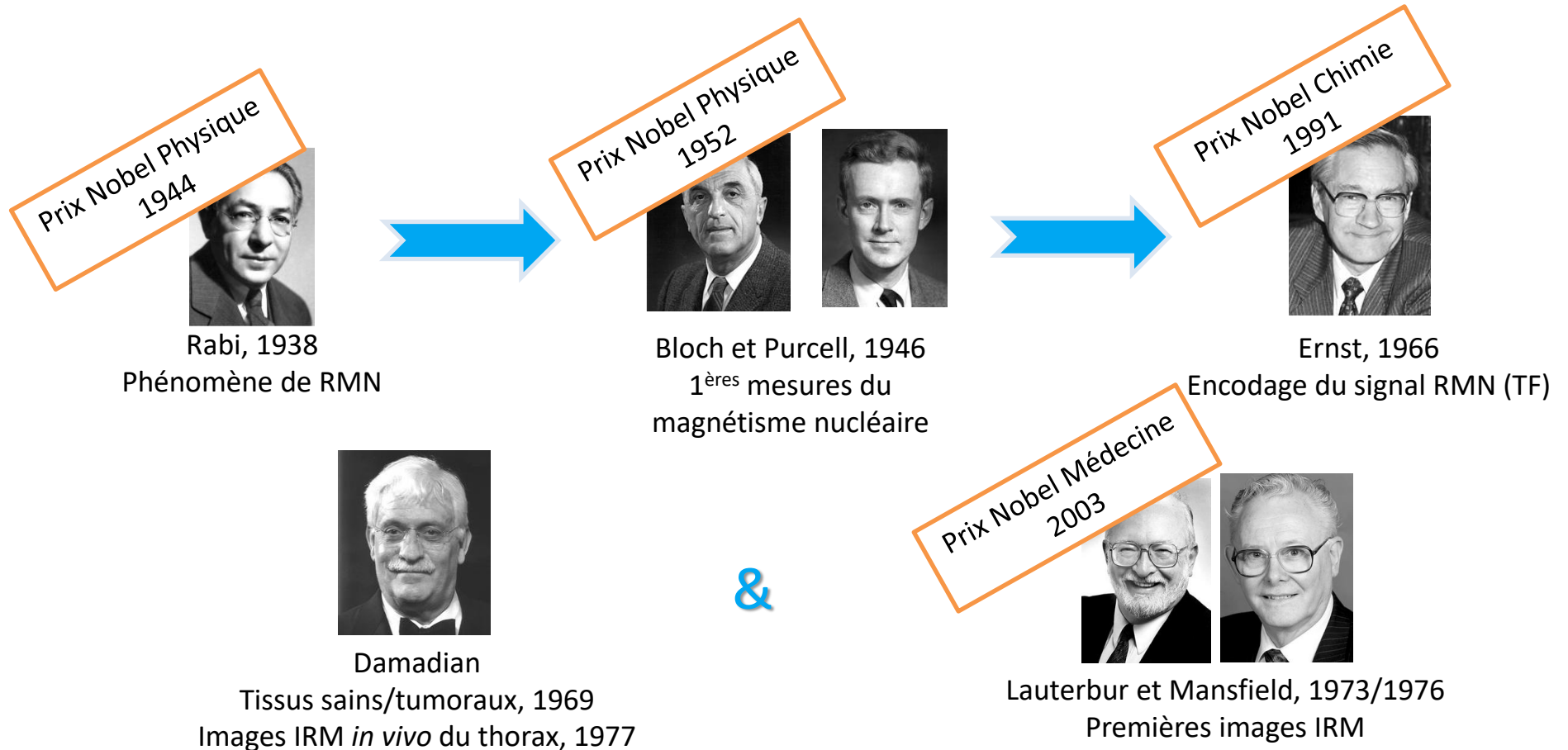


Introduction : l'IRM



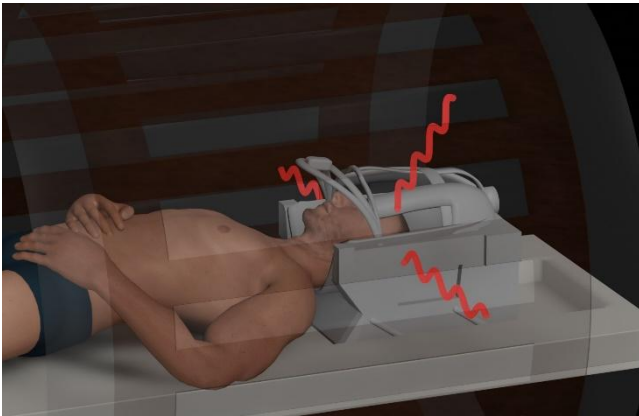
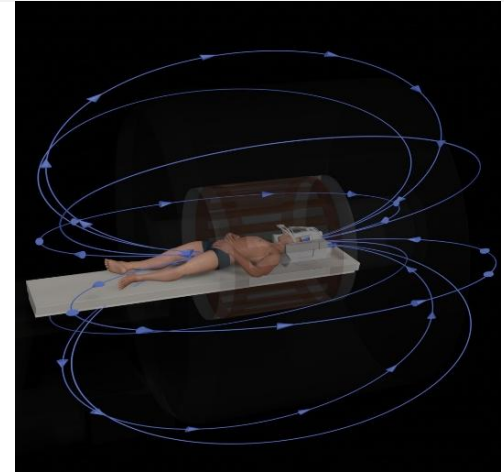
Introduction : l'IRM

- Utilise de nombreux principes et phénomènes physiques, dont le principal est celui de la **Résonance Magnétique Nucléaire**



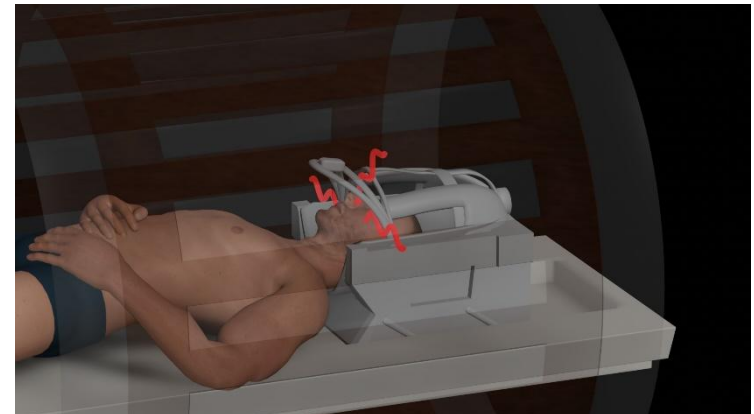
L'IRM simplifiée en première approche

- ➡ **Etape 1 :** Le patient entre dans le **champ magnétique intense** de l'IRM (classiquement 1.5 T ou 3 T en clinique)
→ aimantation des tissus

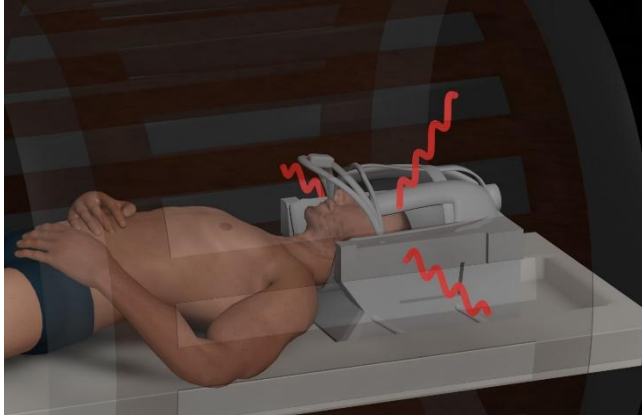


- ➡ **Etape 2 :** Emission d'onde radiofréquence (énergie) et absorption de cette énergie dans le corps = **antenne radiofréquence**

- ➡ **Etape 3 :** Relaxation du signal / retour à l'équilibre = réception d'une onde (énergie) radiofréquence, par une **antenne radiofréquence**



L'IRM simplifiée en première approche



➡ **Etape 2** : Emission d'une onde radiofréquence et absorption de l'énergie dans le corps

L'onde radiofréquence est émise avec une fréquence dépendant du champ magnétique B_0 de l'IRM :

$$f_L = \frac{\gamma}{2\pi} * B_0$$



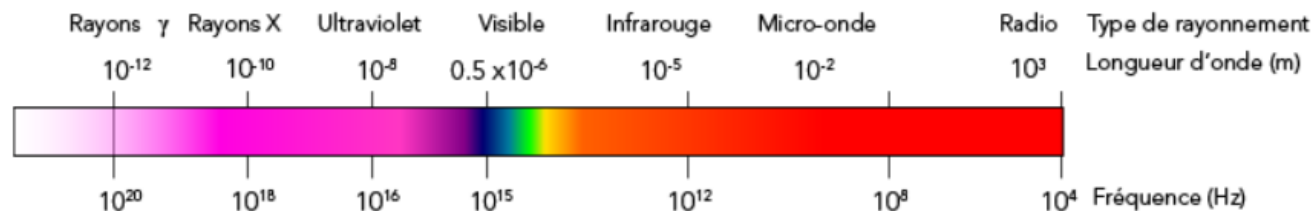
f_L = fréquence de résonance (Hz) (de Larmor)

γ = rapport gyromagnétique (fonction de l'atome). Pour l'hydrogène, $\frac{\gamma}{2\pi} = 42,58 \text{ MHz/T}$

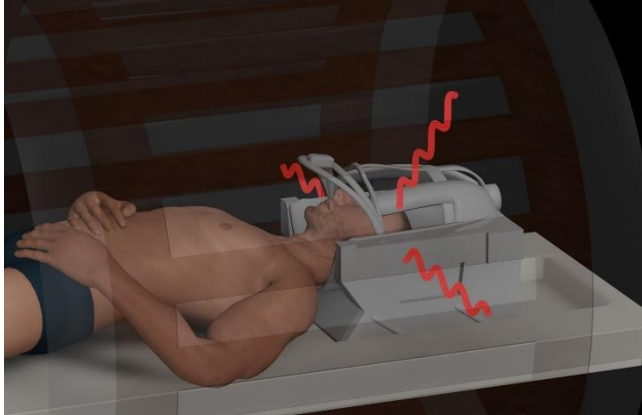
B_0 = champ magnétique statique

→ A 1.5 T, $f_L = 64 \text{ MHz}$ et à 3 T, $f_L = 128 \text{ MHz}$

Domaine des ondes radiofréquences (spectre EM)



L'IRM simplifiée en première approche



➡ **Etape 2** : Emission d'une onde radiofréquence et absorption de l'énergie dans le corps

L'onde radiofréquence est émise avec une fréquence dépendant du champ magnétique B_0 de l'IRM :

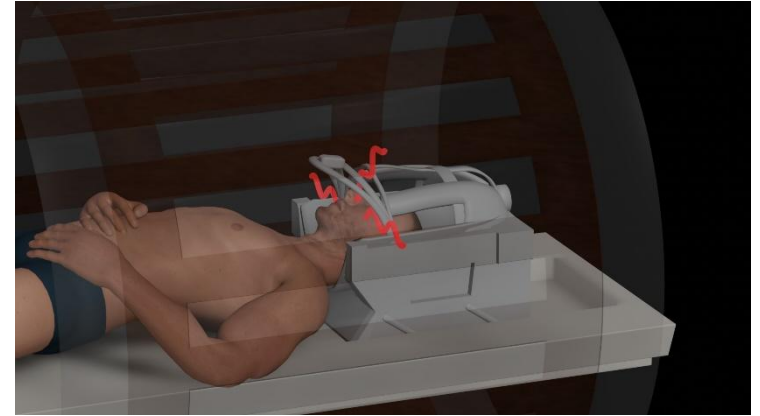
$$f_L = \frac{\gamma}{2\pi} * B_0$$

- ➡ Si la fréquence de l'onde RF envoyée n'est pas à 64 MHz (1,5T) ou 128 MHz (3T), il n'y aura pas de signal mesuré = pas d'image IRM
- ➡ C'est le phénomène de **résonance**



L'IRM simplifiée en première approche

➡ **Etape 3** : Relaxation du signal / retour à l'équilibre
= réception d'une onde radiofréquence (énergie),
par une **antenne radiofréquence**



La relaxation du signal (ou retour à l'équilibre après l'envoi d'énergie RF) est fonction de 2 constantes de temps propres aux tissus :

- Le temps T1
- Le temps T2
- (+ la densité de protons)

1. Bases physiques de la résonance magnétique nucléaire

- a. Polarisation des tissus
- b. Résonance et excitation
- c. Relaxation

2. De la RMN à l'IRM : principe d'acquisition d'une image

- a. Gradients de champs magnétiques
- b. Sélection de coupe
- c. Codage de phase et fréquence
- d. Espace k

Bases physiques de la résonance magnétique nucléaire

1. Bases physiques de la résonance magnétique nucléaire

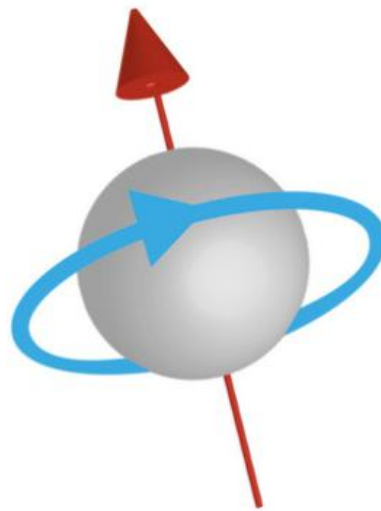
- a. Polarisation des tissus
- b. Résonance et excitation
- c. Relaxation

2. De la RMN à l'IRM : principe d'acquisition d'une image

- a. Gradients de champs magnétiques
- b. Sélection de coupe
- c. Codage de phase et fréquence
- d. Espace k

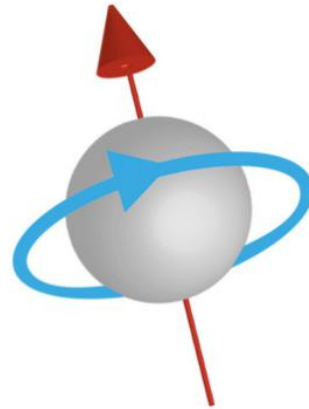
Polarisation des tissus : qu'est-ce qu'un spin ?

- Le noyau d'hydrogène est constitué d'un proton (=particule de charge électrique positive)
- Il est animé d'un mouvement de **rotation axiale**.
- Cette rotation du proton sur lui-même est caractérisée par une grandeur physique appelée moment cinétique (intrinsèque)
- Ce moment cinétique de spin $\vec{s}$, que l'on appelle plus couramment *spin*, peut être représenté sous la forme d'un vecteur (en rouge ci-dessous) tournant sur lui-même



Polarisation des tissus : qu'est-ce qu'un spin ?

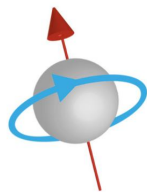
- Toute charge électrique en mouvement induit autour d'elle un champ magnétique
- Le proton d'hydrogène (ayant une charge électrique) tourne sur lui-même = il en découle une **aimantation microscopique** $\vec{\mu}$.



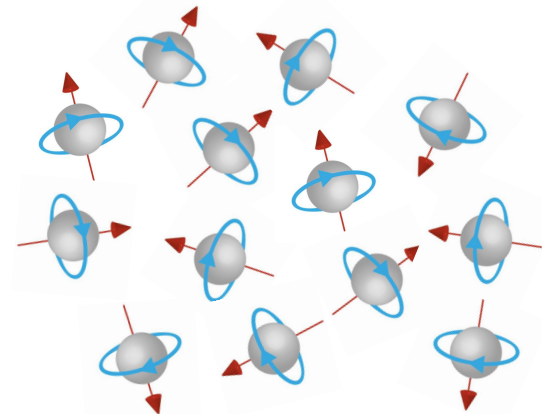
A retenir : par simplification, on peut voir les spins comme des petites toupies dans chaque noyau d'hydrogène (proton) et qui produisent une petite aimantation $\vec{\mu}$

Polarisation des tissus : ça tourne !

- Le corps humain est constitué principalement d'eau = d'une multitude de noyaux d'hydrogène.
- La RMN (Résonance Magnétique Nucléaire) repose sur un **phénomène microscopique** (les *spins*), mais s'intéresse au comportement **macroscopique** d'un grand nombre de spins (=ensemble de spins).
- Ainsi, on ne s'intéresse pas à l'aimantation microscopique, mais à **l'aimantation macroscopique** totale des spins, qu'on va noter $\vec{M}$.



Un proton
= un spin d'aimantation microscopique $\vec{\mu}$



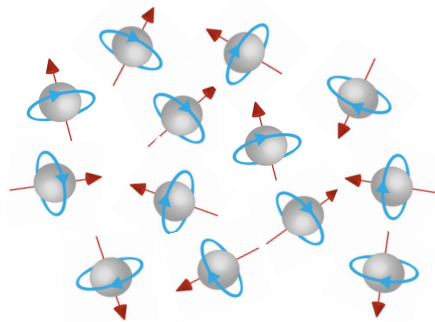
Les tissus humains (composés de protons)
= ensemble de spins, aimantation macroscopique

$$\vec{M} = \sum \vec{\mu}_i$$

Polarisation des tissus : les spins

En l'absence de champ magnétique extérieur :

- Les spins s'orientent de façon aléatoire dans toutes les directions de l'espace
- L'aimantation macroscopique résultante est nulle (en moyenne, pas d'aimantation)



$$\vec{M} = \sum \vec{\mu}_i = \vec{0}$$

On applique un champ magnétique extérieur $\vec{B}_0$ (« le tunnel » de l'IRM)

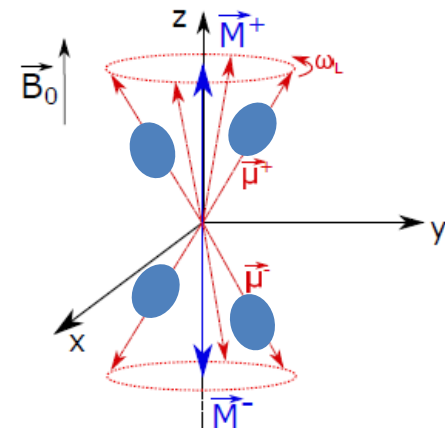
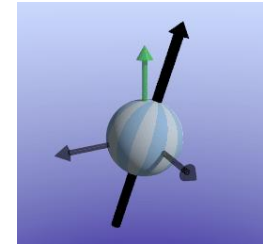
- Les spins vont s'aligner dans la direction du champ magnétique, soit dans le même sens, soit le sens opposé,
- Et ils vont précesser (mouvement d'une toupie) autour de l'axe de champ magnétique
- La vitesse de précession (de rotation) des spins est égale à :



$$\omega_L = \gamma B_0$$

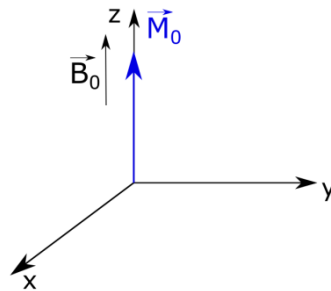
Pulsation de Larmor

γ est le rapport gyromagnétique. Pour l'eau : $\gamma/(2\pi) = 42,58 \text{ MHz/T}$



Polarisation des tissus : les spins

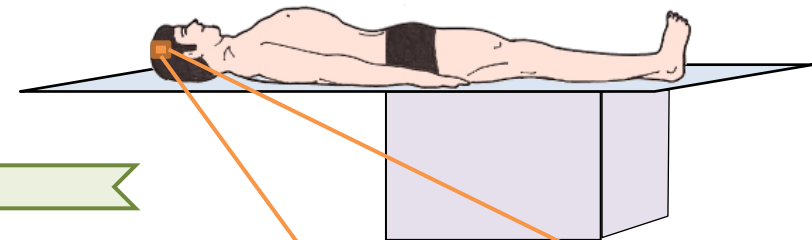
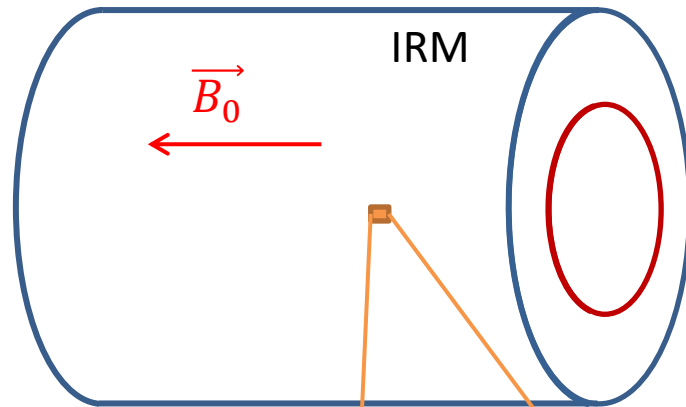
- Un des 2 sens d'orientation va être prédominant (+ de spins d'un côté que de l'autre) :
 $\overrightarrow{M}^+ > \overrightarrow{M}^-$
- L'aimantation macroscopique résultante **n'est pas nulle**



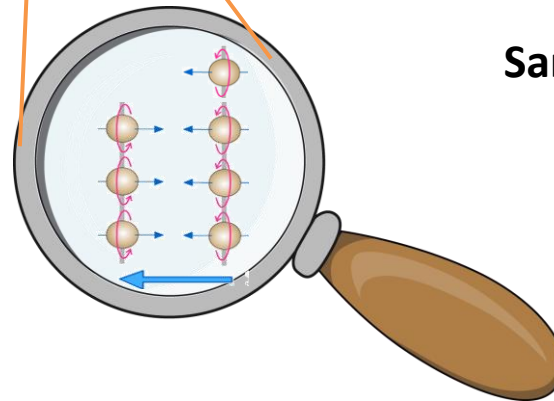
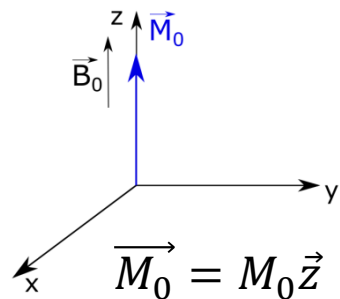
$$\overrightarrow{M}_0 = \sum \vec{\mu}_i = M_0 \vec{z}$$

En résumé, en présence d'un champ magnétique extérieur (= le « tunnel » de l'IRM), les spins des tissus du corps humain vont s'orienter dans la direction du champ magnétique et créer une aimantation $\overrightarrow{M}_0$ (c'est dit de façon très raccourcie, mais c'est l'idée 😊)

Polarisation des tissus : ce qu'il faut absolument retenir !

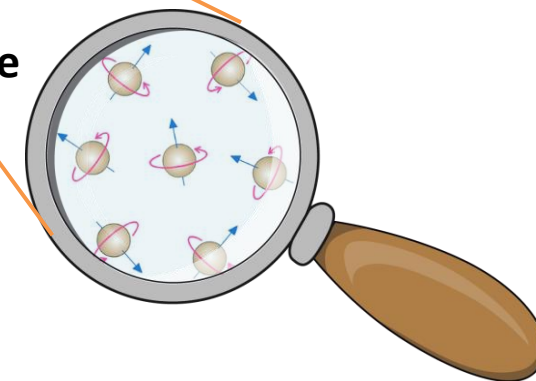


Avec champ magnétique statique $\vec{B}_0$

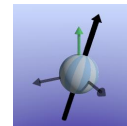


Sans champ magnétique

$$\vec{M}_0 = \vec{0}$$

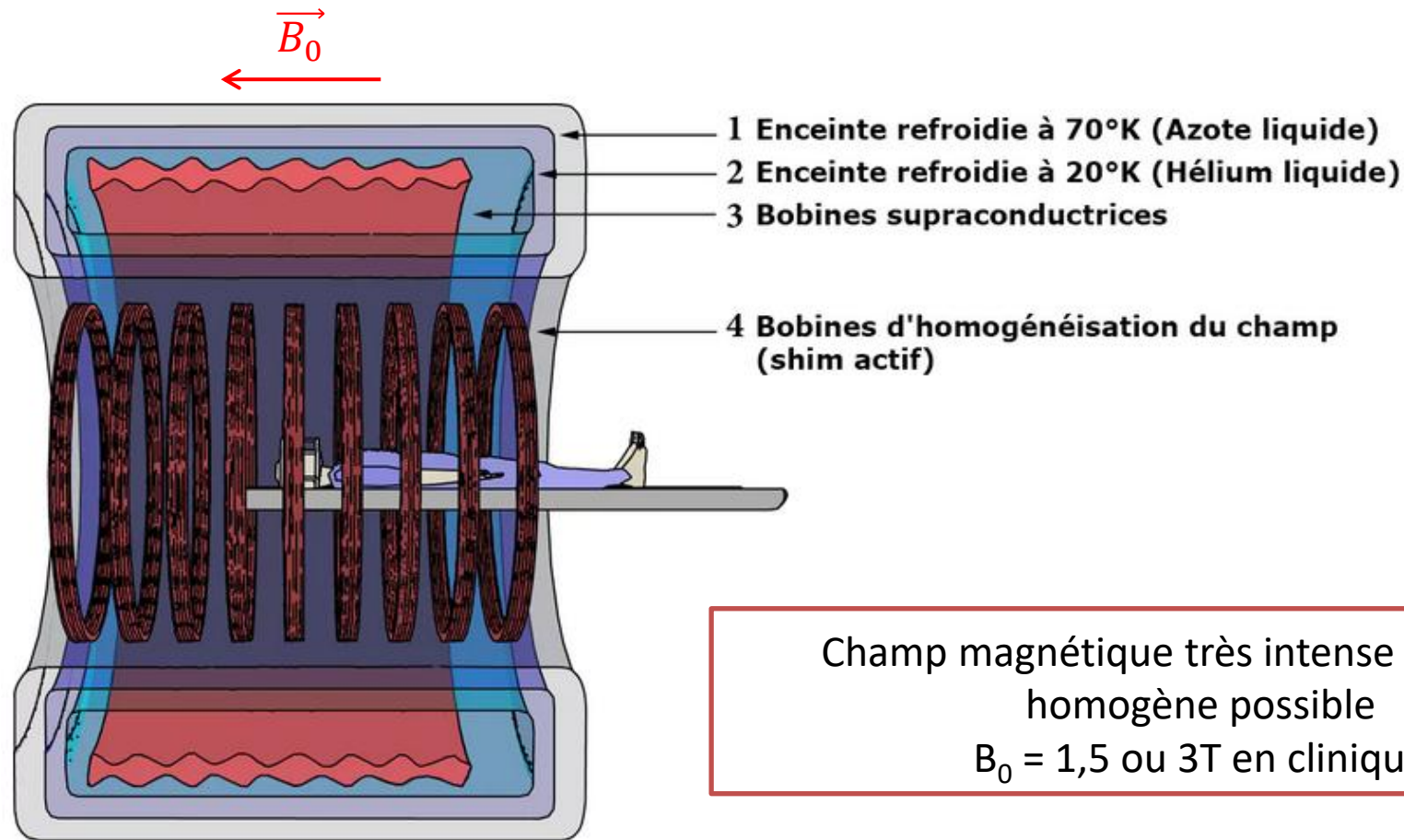


$\vec{M}_0$ est la résultante de millions de spins qui précessent autour de $\vec{B}_0$ à la vitesse $\omega_L = \gamma B_0$



Polarisation des tissus : matériel associé

Electro-aimants supraconducteurs



(en comparaison, champ magnétique terrestre : $4.7 \cdot 10^{-5}$ T)

1. Bases physiques de la résonance magnétique nucléaire

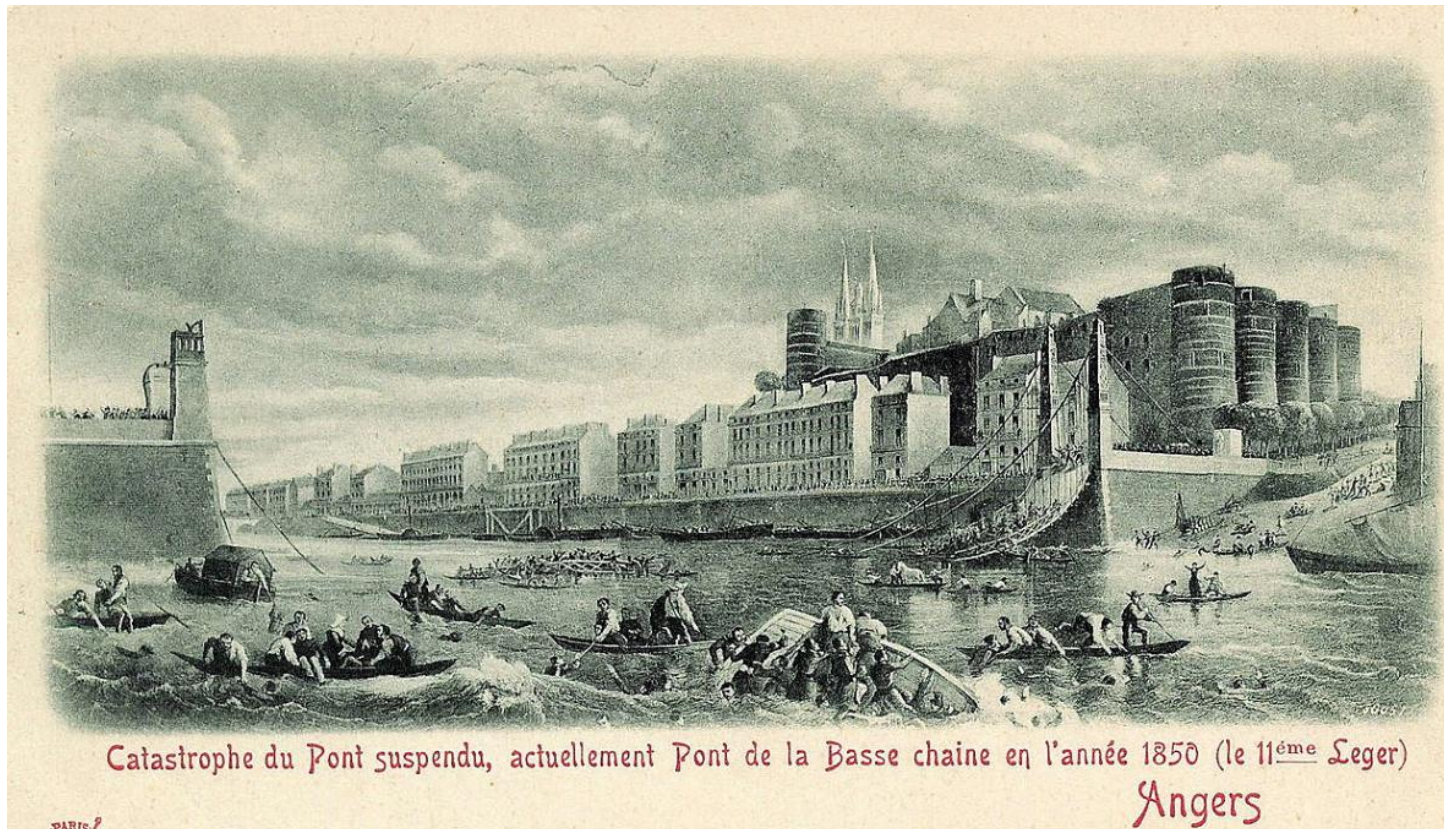
- a. Polarisation des tissus
- b. Résonance et excitation
- c. Relaxation

2. De la RMN à l'IRM : principe d'acquisition d'une image

- a. Gradients de champs magnétiques
- b. Sélection de coupe
- c. Codage de phase et fréquence
- d. Espace k

La résonance en physique

« La **résonance** est un phénomène selon lequel certains systèmes physiques (électriques, mécaniques ...) sont sensibles à certaines fréquences » (Wikipedia)



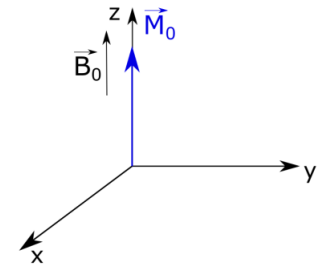
La résonance en physique

« La **résonance** est un phénomène selon lequel certains systèmes physiques (électriques, mécaniques ...) sont sensibles à certaines fréquences » (Wikipedia)

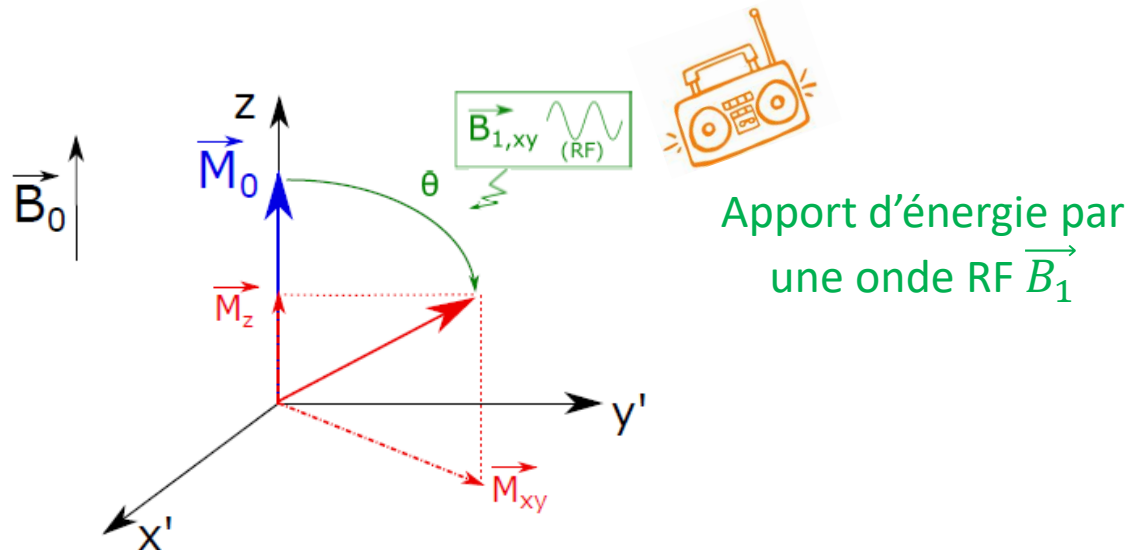


Phénomène de résonance

- ➡ Première étape vue précédemment (polarisation) = le champ magnétique extérieur $\vec{B}_0$ a permis de créer une aimantation macroscopique des tissus $\vec{M}_0$, qui est la somme de millions de spins qui précessent autour de $\vec{B}_0$ à la vitesse de rotation : $\omega_L = \gamma B_0$



- ➡ La deuxième étape consiste à faire basculer cette aimantation dans le **plan transverse**, grâce à l'apport d'une **onde radiofréquence** (= onde EM comme dans votre poste de radio).



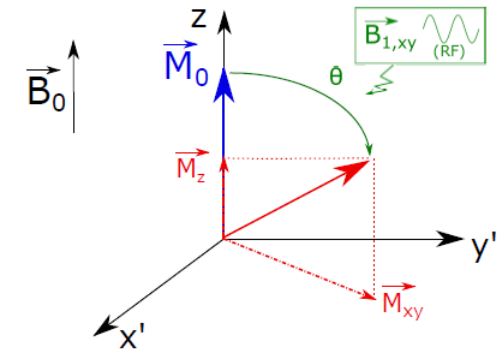
Phénomène de résonance

Pourquoi parle-t-on de **résonance** et d'onde/impulsion **radiofréquence** ?

- ➡ La bascule de l'aimantation $\vec{M}_0$ n'est possible que si l'onde radiofréquence $\vec{B}_1$ qui est appliquée a une fréquence égale à la fréquence de Larmor (= fréquence de précession des spins) = phénomène de **résonance**.

$$\vec{B}_1 = B_1 \cos(\omega_L t) \cdot \vec{x}$$

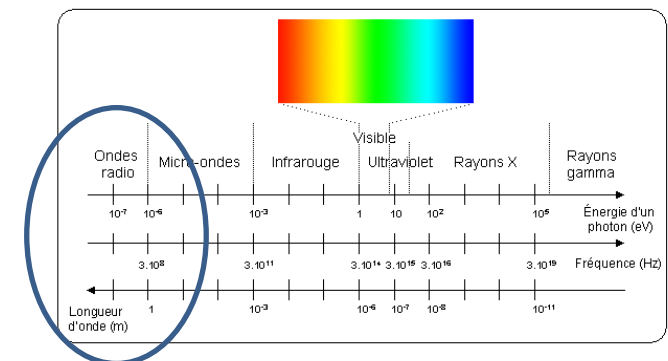
$$\text{Avec } \omega_L = \gamma B_0$$



- ➡ Calculons l'ordre de grandeur de cette fréquence pour 1 IRM 3T :

$$f_L = \frac{\omega_L}{2\pi} = \frac{\gamma}{2\pi} * B_0 = 42,85 \text{ MHz} \cdot T^{-1} * 3 \text{ T} = 128 \text{ MHz}$$

128 MHz = fréquence dans le domaine des radiofréquences dans le spectre EM



Phénomène de résonance

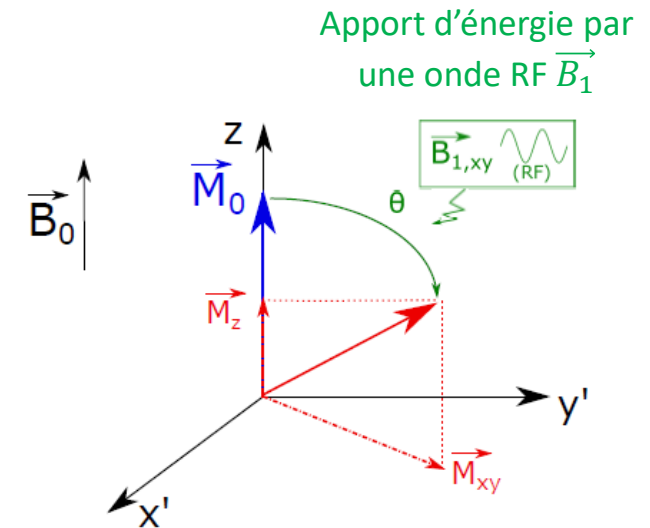
➡ Le bascule de l'aimantation par une onde radiofréquence (RF) va créer une **aimantation longitudinale** $\vec{M}_z$ et une **aimantation transversale** $\vec{M}_{xy}$

➡ L'angle de bascule est égal à :

$$\theta(rad) = \gamma B_1 \tau_{RF}$$

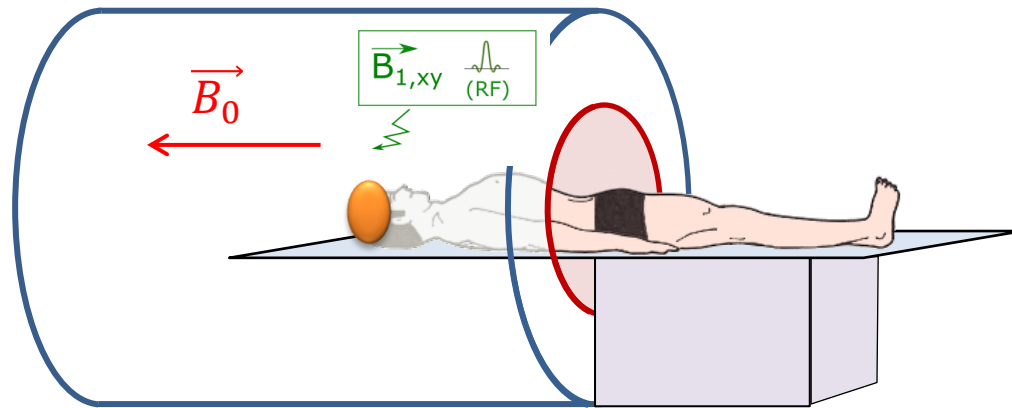
➡ En IRM, on a généralement :

- B_1 est l'amplitude de l'impulsion RF, de l'ordre du μT
- τ_{RF} est la durée de l'impulsion RF, de l'ordre de la ms = **impulsion RF**



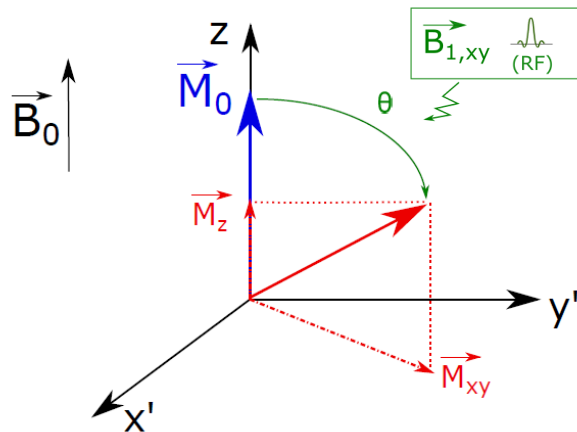
[Phase d'excitation du phénomène de résonance magnétique nucléaire en IRM \(imaios.com\)](http://imaios.com)

Résonance : ce qu'il faut absolument retenir !



Impulsion radio-fréquence (RF)

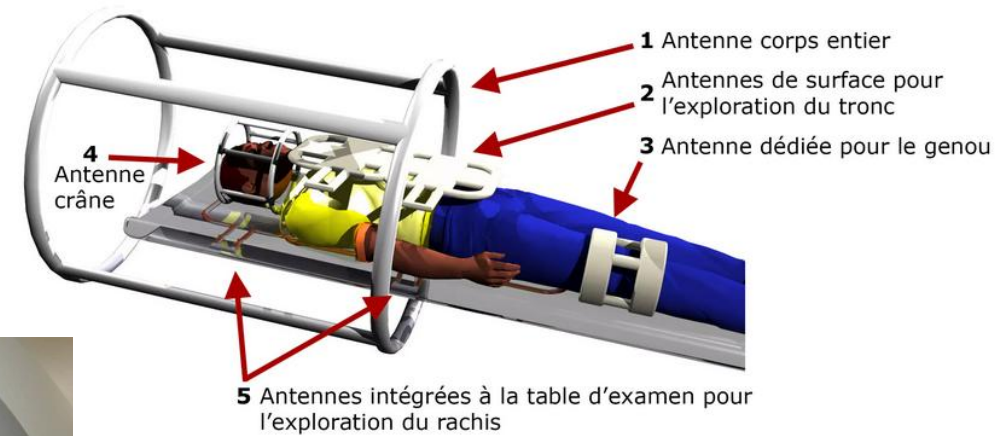
- De fréquence : $f_L = \frac{\omega_L}{2\pi} = \frac{\gamma}{2\pi} * B_0$
- Bascule l'aimantation d'un angle : $\theta = \gamma B_1 \tau_{RF}$



Apparition d'une aimantation transversale $\vec{M}_{xy}$

Phénomène de résonance : matériel associé

Les antennes radiofréquence



Phénomène de résonance : matériel associé

Les antennes radiofréquence



Antennes volumiques



Antennes de surface



1. Bases physiques de la résonance magnétique nucléaire

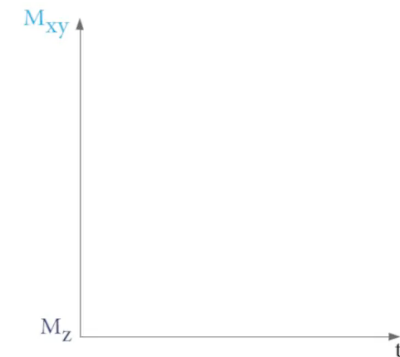
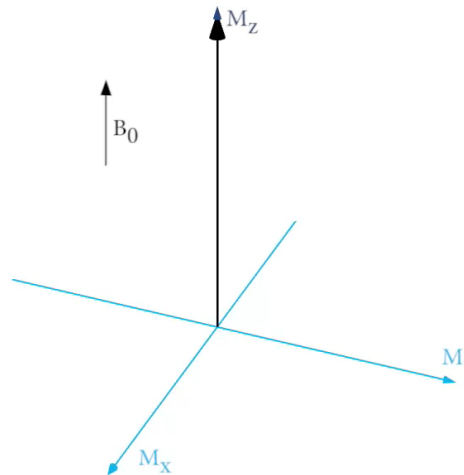
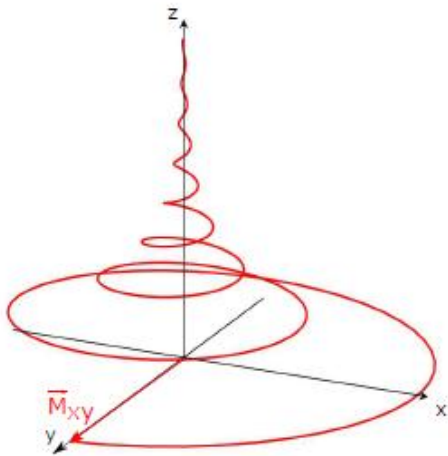
- a. Polarisation des tissus
- b. Résonance et excitation
- c. Relaxation

2. De la RMN à l'IRM : principe d'acquisition d'une image

- a. Gradients de champs magnétiques
- b. Sélection de coupe
- c. Codage de phase et fréquence
- d. Espace k

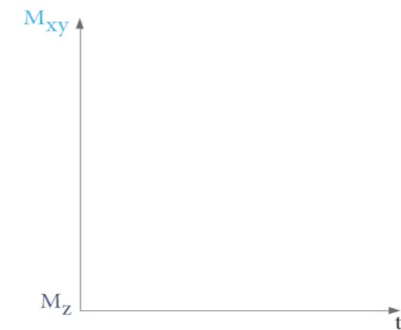
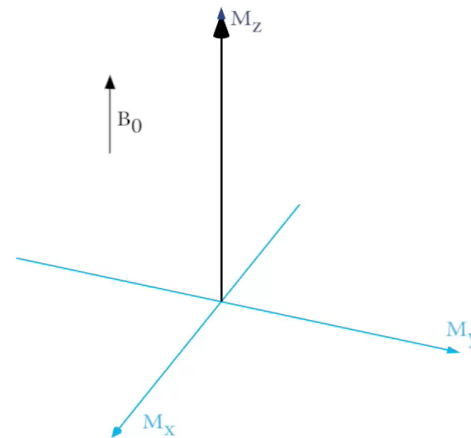
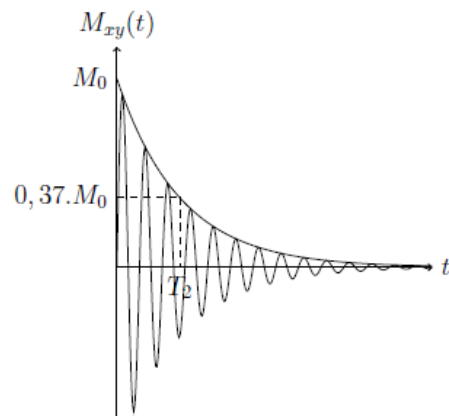
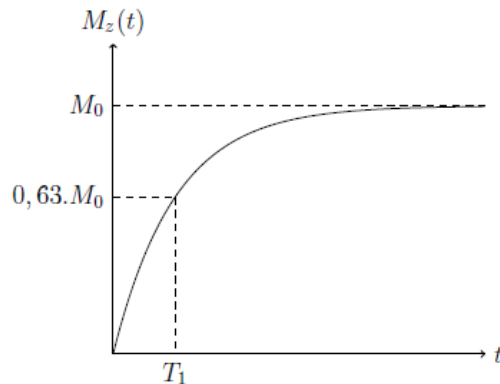
Relaxation

- ➡ Deuxième étape : typiquement, on bascule l'aimantation d'un angle $\theta = 90^\circ$ en IRM.
- Une fois l'aimantation arrivée à 90° , on **arrête** l'impulsion RF (qui a duré qq ms).
 - Il n'y a alors plus d'aimantation longitudinale (selon z), mais seulement une aimantation transversale (plan transverse xy).
- ➡ Après l'impulsion RF, l'aimantation va alors revenir à son état initial (état d'équilibre en z) = on parle de relaxation.



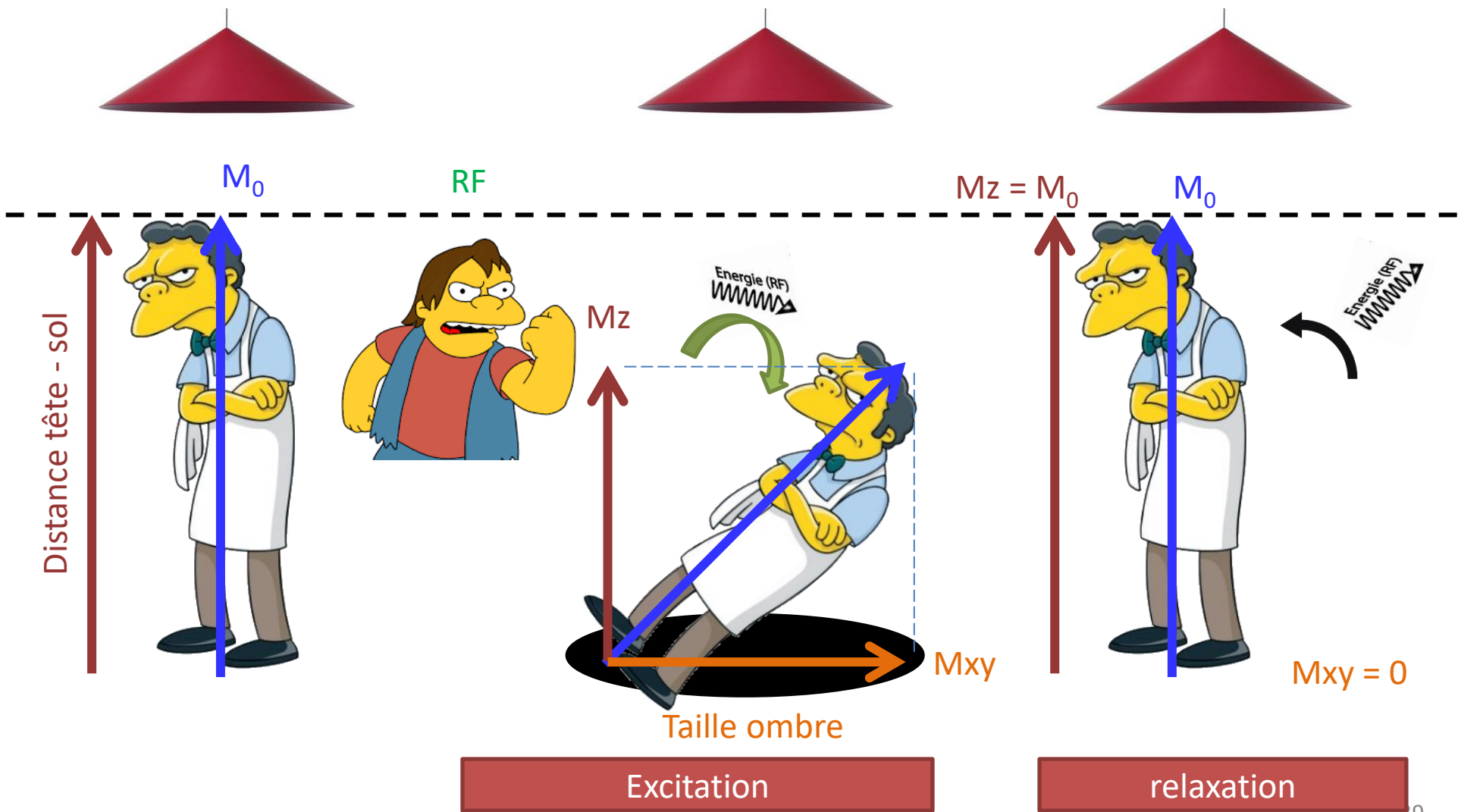
Relaxation : temps T1 et T2

- ↪ Les temps de relaxation des aimantations longitudinale et transversale ne sont pas les mêmes
- Temps caractéristique de la repousse de l'aimantation longitudinale : **T1**
 - Temps caractéristique de la décroissance de l'aimantation transversale : **T2**



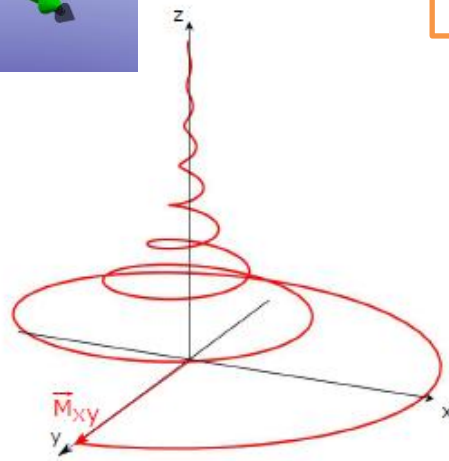
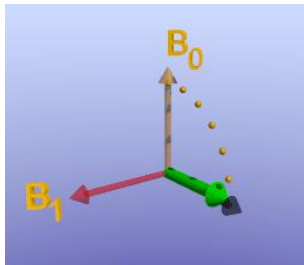
Relaxation du signal

La relaxation imagée



Relaxation du signal

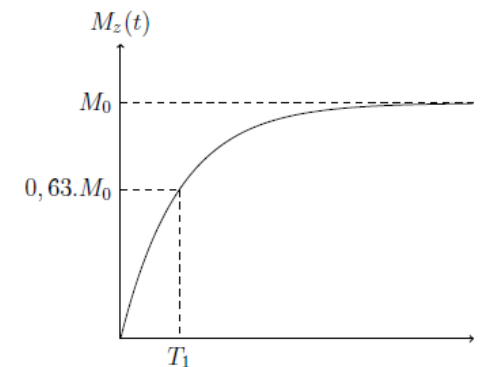
↪ La relaxation plus en détails ...



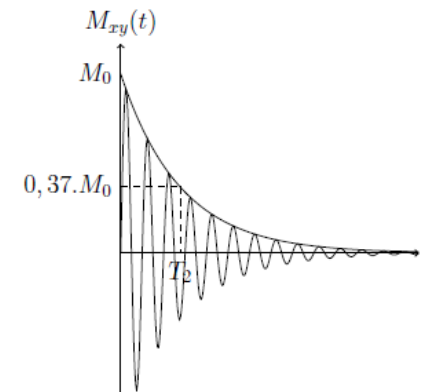
Repousse en T_1

Décroissance en T_2

Relaxation longitudinale = le long de l'axe z

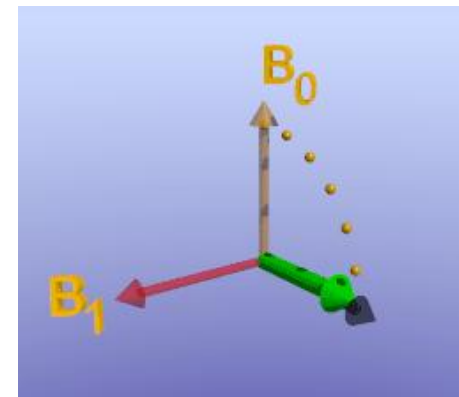
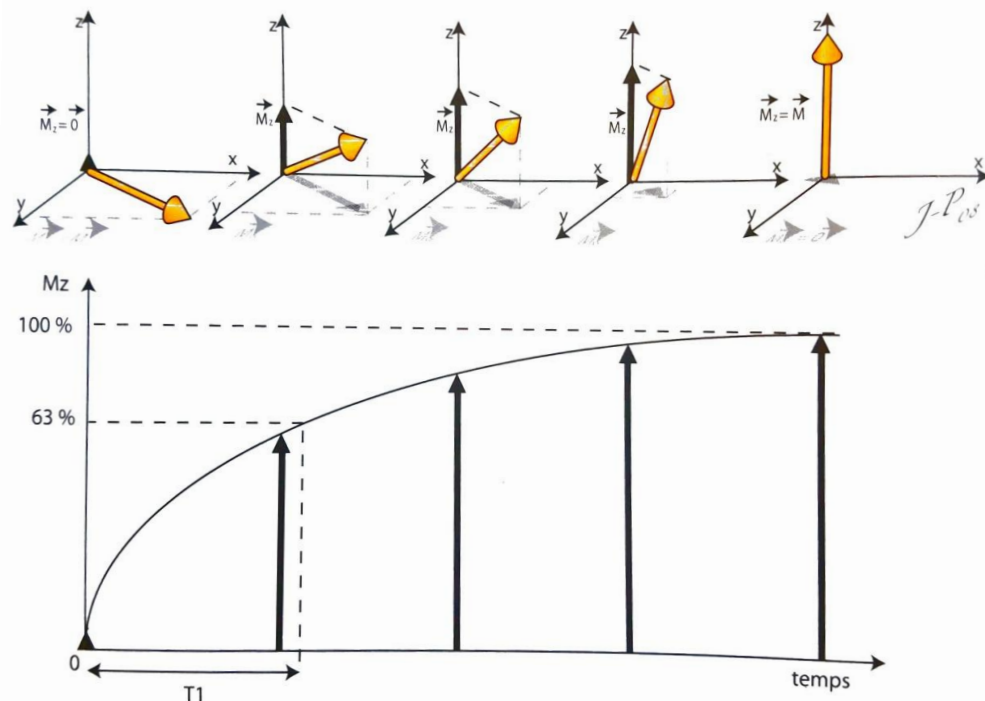
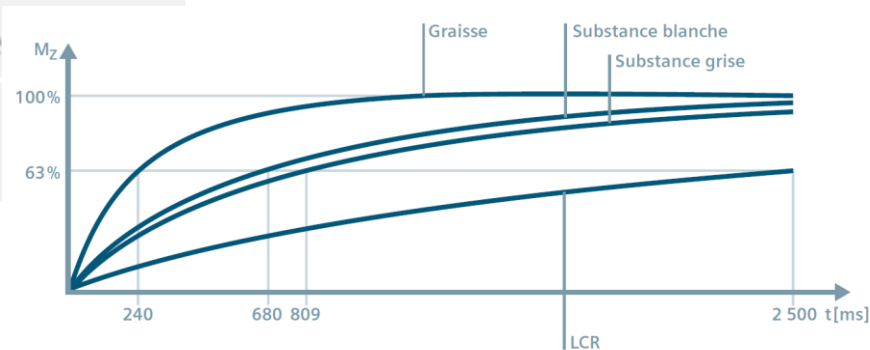


Relaxation transversale = dans le plan xy



Relaxation du signal

Relaxation longitudinale



$$M_z = M_0 \cdot (1 - e^{-(t/T_1)})$$

!

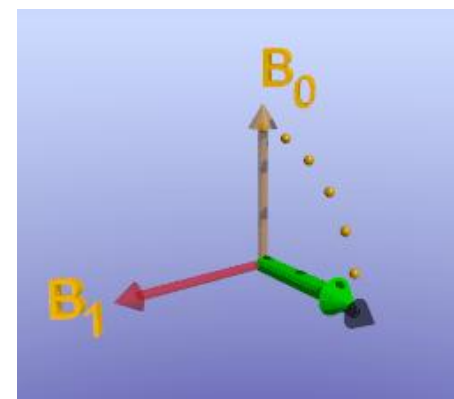
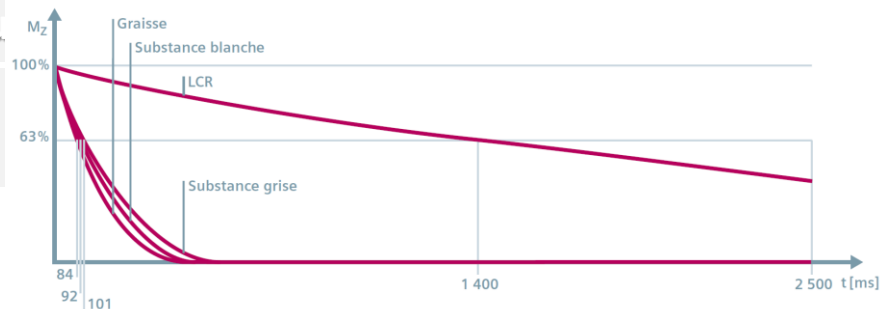
Relaxation longitudinale
Relaxation T_1
Relaxation Spin-réseau



T_1 : temps pour lequel 63% de l'aimantation M_0 a été retrouvé

Relaxation du signal

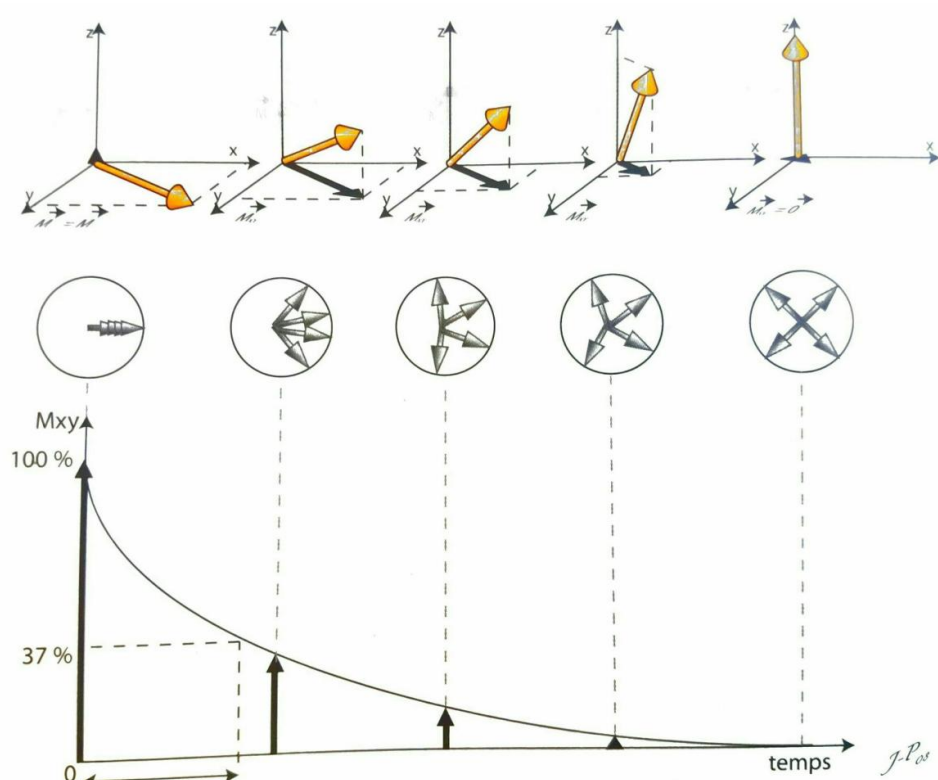
Relaxation transversale



$$M_{xy} = M_0 \cdot e^{(-t/T2)}$$



Relaxation transversale
Relaxation T2
Relaxation Spin-spin



T2 : temps pour lequel 37% de l'aimantation M_{xy} est restant

Relaxation du signal

↳ Relaxation **longitudinale** vs **transversale**

Relaxation **longitudinale** = T1

- Relaxation T1 ou spin réseau
- Libération d'énergie thermique des spins
- **Repousse de l'aimantation Mz**
- T1 = temps pour que Mz = **63% de son état initial**
- Dépend du champ magnétique B0
- Plus lent dans l'eau libre et milieux avec mouvements moléculaires rapides ou très lents (glace)
- Plus rapide dans milieux avec grosses molécules tels les graisses
- Beaucoup plus grand que temps T2 (x100)
- 500 ms < T1 tissus < 2000 ms

Relaxation **transversale** = T2

- Relaxation T2 ou spin-spin
- Déphasage des spins - inhomogénéités de champs propre aux tissus
- **Décroissance de l'aimantation Mxy**
- **T2 = temps pour que Mxy retombe à 37% de sa valeur après excitation**
- Plus long dans structure liquidienne
- Beaucoup plus petit que T1 (1/100)
- 30 ms < T2 tissus < 100 ms



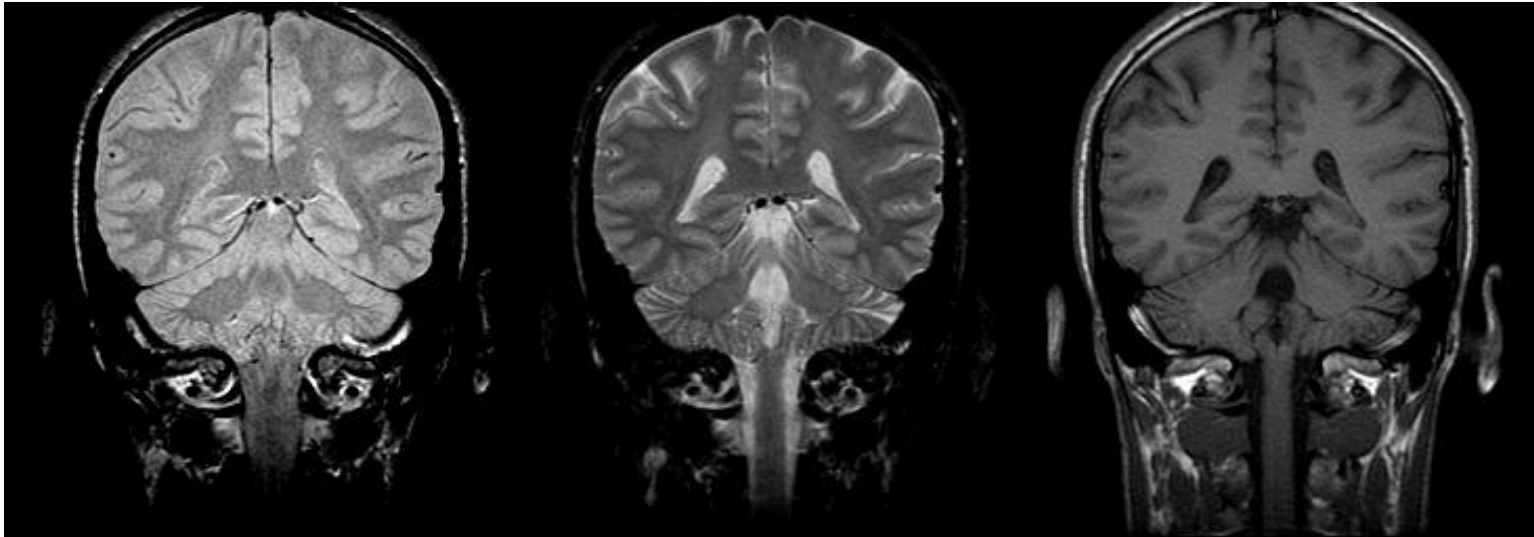
T1 > T2

Relaxation : temps T1 et T2

- ↪ Ces temps de relaxation T1 et T2 sont caractéristiques des tissus
- ↪ Chaque tissu humain est caractérisé par son T1 et son T2

T1 LCR=2400ms
T1 Mat Grise=760ms
T1 Mat Blanche= 510ms

T2 LCR=160ms
T2 Mat Grise=77ms
T2 Mat Blanche=67ms



Pondérée densité

Pondérée T2

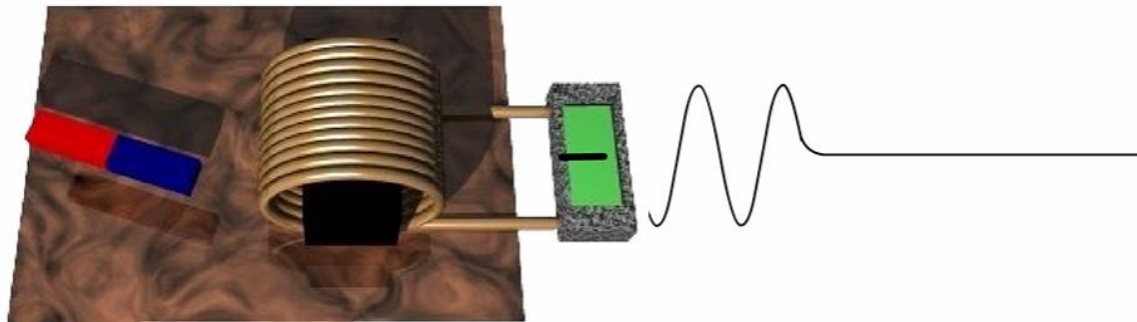
Pondérée T1

- Chaque tissu a son temps de relaxation T1 et T2 et pondération en densité
- Job de l'IRM = imager ces différences = différents contrastes possibles

Relaxation : réception du signal

- Une antenne de réception du signal va « capter » ce retour à l'équilibre.
- Cette antenne peut être la même que celle utilisée en émission, ou une autre antenne différente.
- Antenne = bobine qui détecte une variation de flux due à la précession de l'aimantation transversale → aux bornes de la bobine, on obtient un signal électrique sinusoïdal exponentiellement amorti avec la constante de temps T_2 .

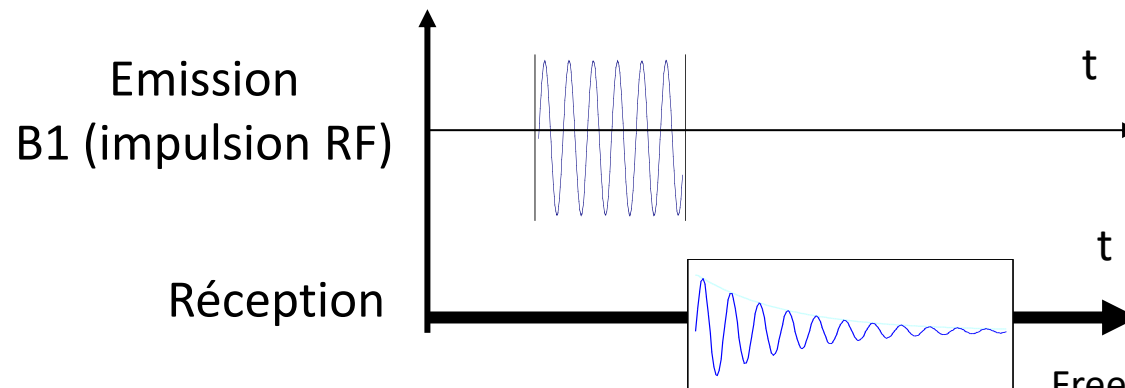
[Enregistrement du signal en IRM \(imaios.com\)](http://imaios.com)



Qu'est ce qu'une séquence IRM ?

- Séquence IRM = chronogramme de ce qu'il se passe/ce qui est activé

Séquence IRM

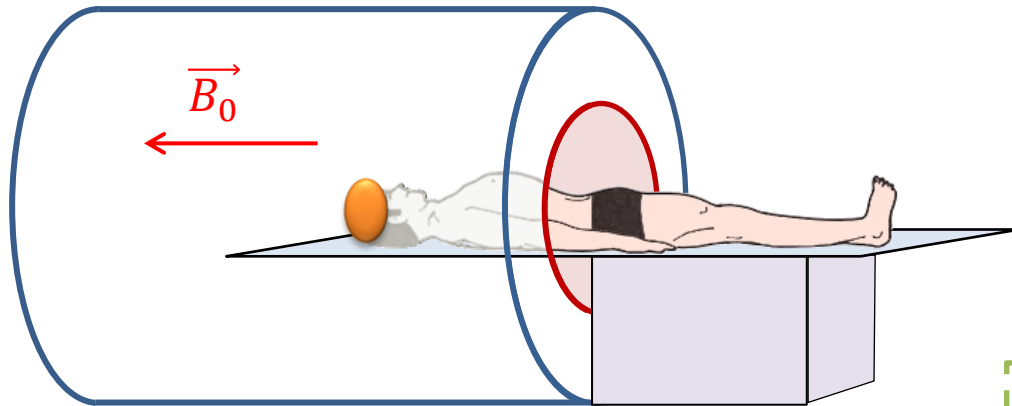


+ on va ajouter ensuite sur ce chronogramme les gradients de champs magnétiques → 2^e partie du cours

Free Induction Decay (FID) = signal de précession libre = aimantation transverse qui redevient longitudinale = produit un courant mesurable dans une bobine

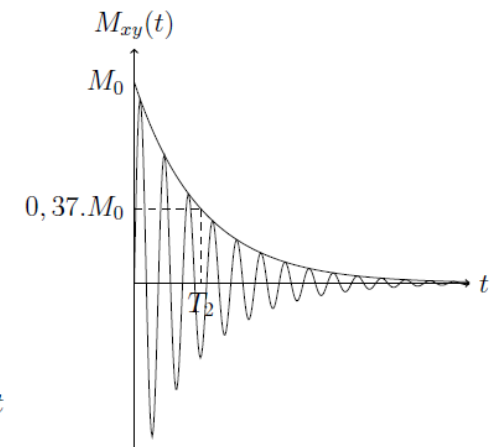
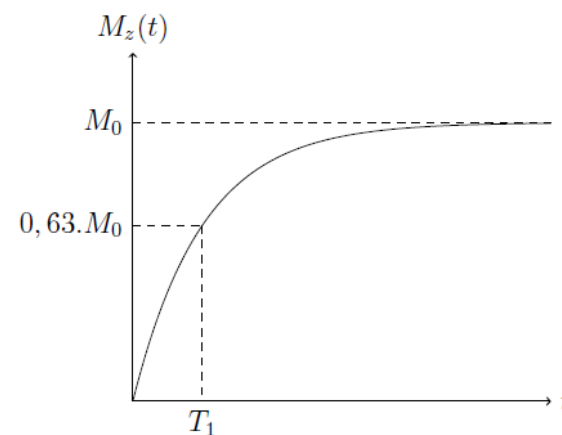
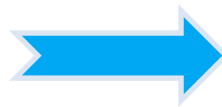
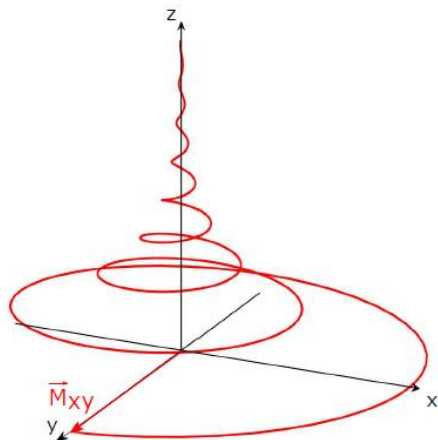
- Une séquence IRM = un jeu d'images IRM avec un certain contraste (T1, ou T2 ...)
- Un examen clinique IRM = plusieurs séquences IRM permettant d'avoir plusieurs jeux d'images pour améliorer le diagnostic

Relaxation : ce qu'il faut absolument retenir !



Signal de précession libre
recueilli par une antenne

Temps caractéristiques T_1
(aimantation longitudinale) et T_2
(aimantation transversale)



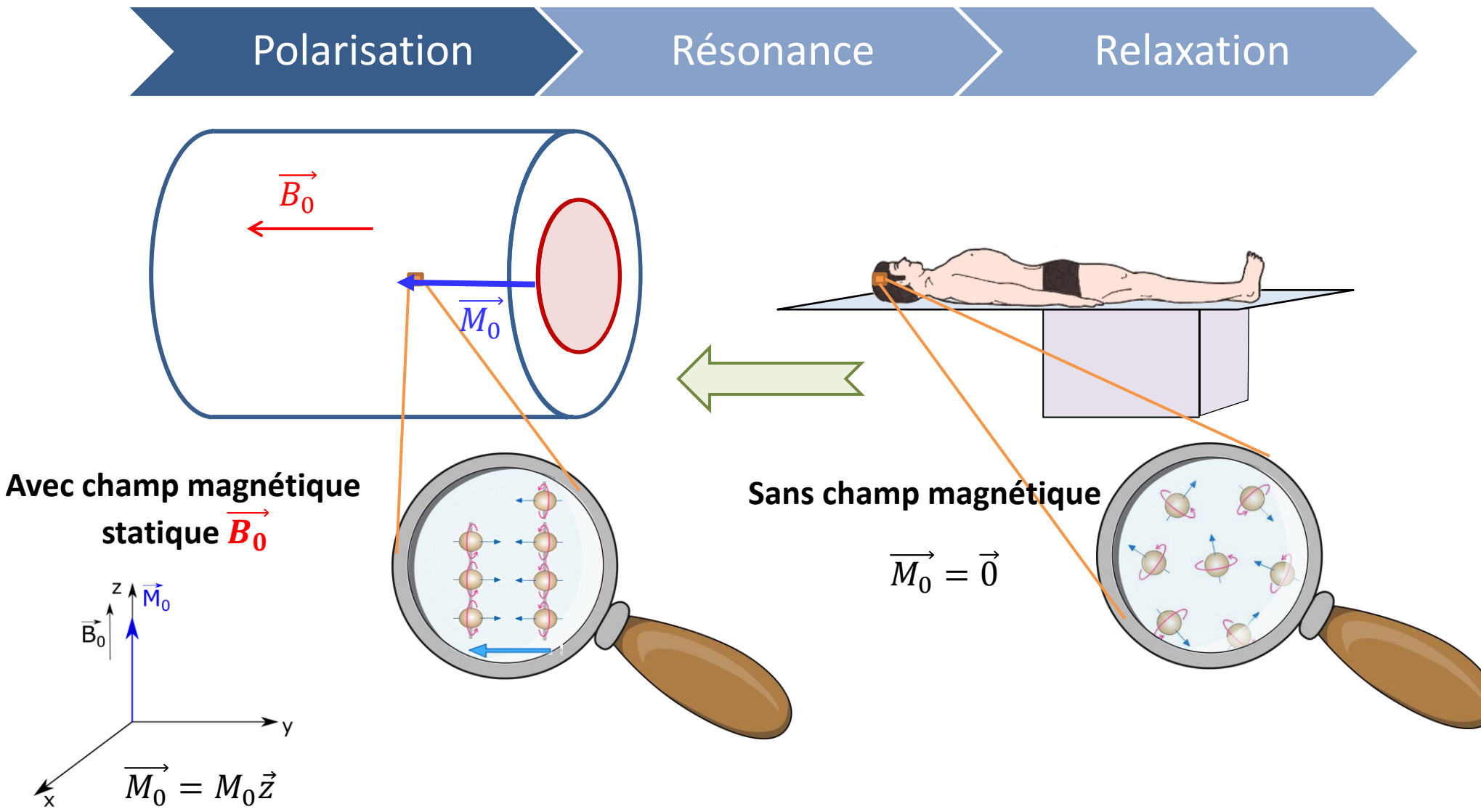
1. Bases physiques de la résonance magnétique nucléaire

- a. Polarisation des tissus
- b. Résonance et excitation
- c. Relaxation

2. De la RMN à l'IRM : principe d'acquisition d'une image

- a. Gradients de champs magnétiques
- b. Sélection de coupe
- c. Codage de phase et fréquence
- d. Espace k

Bilan de cette première partie

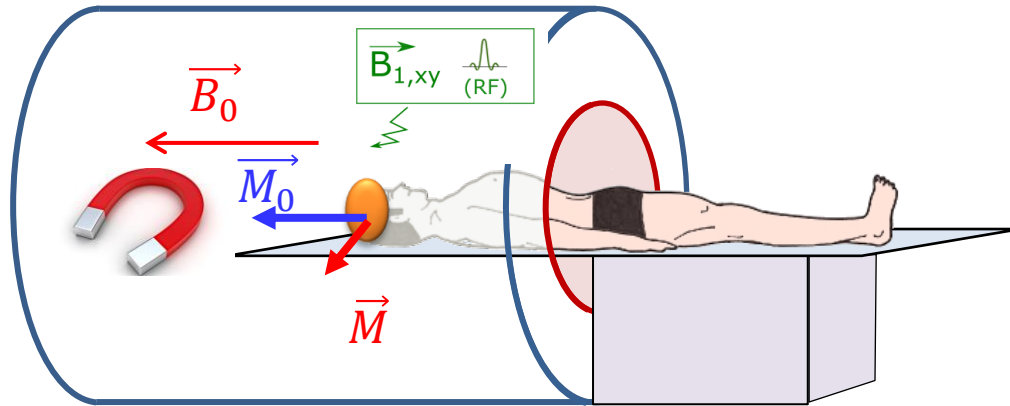


Bilan de cette première partie

Polarisation

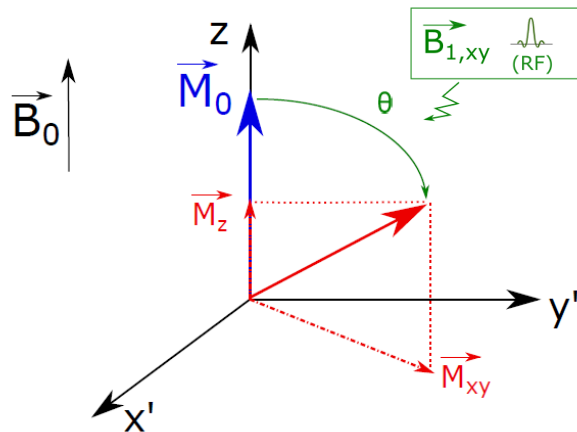
Résonance

Relaxation



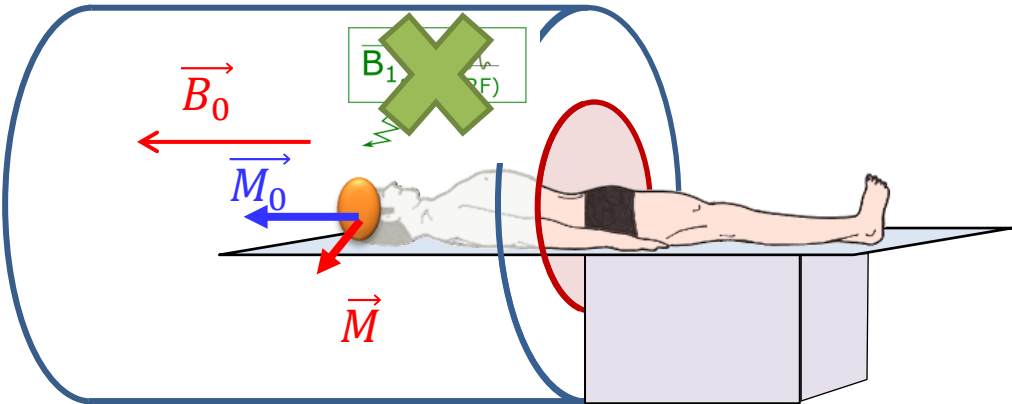
Impulsion radio-fréquence (RF)

- De fréquence : $f_L = \frac{\omega_L}{2\pi} = \frac{\gamma}{2\pi} * B_0$
- Bascule l'aimantation d'un angle : $\theta(rad) = \gamma B_1 \tau_{RF}$



Apparition d'une aimantation transversale $\vec{M}_{xy}$

Bilan de cette première partie



Signal de précession libre
recueilli par une antenne

Temps caractéristiques T_1 et T_2

