

Dr Teniou Batoun

Maitre de conférence class A

Cours de radiologie pour étudiants de 3eme année de médecine dentaire

Service d'imagerie médicale chu de Constantine

Faculté de médecine de Constantine

IMAGERIE PAR RESONANCE MAGNETIQUE **(PRINCIPES GENERAUX)**

OBJECTIFS

- Apprendre les principes physiques de l'IRM.
- Enumérer l'appareillage de la chaine d'IRM.
- Reconnaître les contre-indications de l'examen IRM.
- Apprécier les applications de l'IRM avec une attention particulière au système cardio-vasculaire et respiratoire.

SOMMAIRE

- I. Introduction
- II. Bases physiques
 - 1- Spin nucléaire et moment magnétique
 - 2- Résonance et onde de radiofréquence
 - Excitation
 - Relaxation
 - 3- Signal de RM
- III. Séquences et contraste
- IV. Acquisition et formation de l'image RM
- V. Appareillage et sécurité
- VI. Contre-indications et précautions.
- VII. Conclusion

I. Introduction :

La RMN découverte en 1946 par Bloch et Purcell (Nobel 1952), utilisée en imagerie en 1973. L'IRM repose sur le principe de la résonance magnétique nucléaire (RMN) qui utilise les propriétés quantiques des noyaux atomiques.

L'imagerie par résonance magnétique utilise les propriétés magnétiques des tissus biologiques (protons) soumis à deux champs magnétiques B_0 (statique) alimenté par un courant électrique continu et B_1 (radiofréquence) alimenté par CE alternatif.

Après l'excitation par l'onde de radiofréquence (B_1), le retour à l'état d'équilibre se fait par les phénomènes de relaxation T1 et T2.

II. Bases physiques :

1. Spin nucléaire et moment magnétique :

Dans la matière vivante, le magnétisme provient des atomes.

L'atome est composé d'un noyau et d'électrons qui gravitent selon des trajectoires définies.

Le noyau est composé de nucléons répartis en protons et en neutrons.

Un nombre égal de protons et d'électrons assure la neutralité électrique de l'atome.

Pour un noyau, quand le nombre de protons est identique au nombre de neutrons, le moment magnétique résultant est nul.

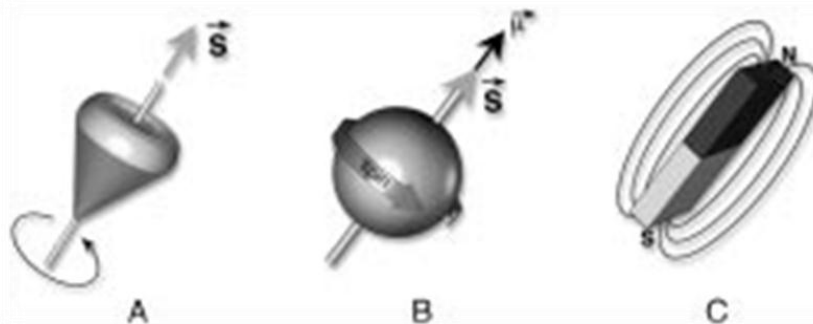
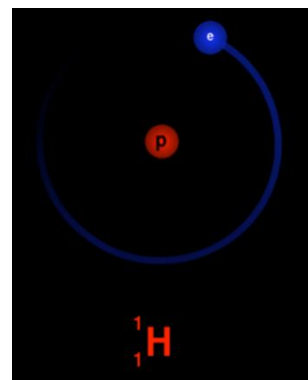
Les principaux constituants atomiques de la matière vivante sont le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, l'azote et le soufre. Parmi ces atomes, l'hydrogène est le constituant principal des tissus mous contenant de 70 à 90 % d'eau.

En fait, le noyau de l'atome d'hydrogène est constitué uniquement par un proton portant une charge positive.

Exemple de la toupie : Au repos, une toupie est couchée sur le côté. Si on lui applique un mouvement de rotation autour de son axe, la toupie se maintient verticalement, sous l'effet d'une force parallèle à son axe de rotation. Cette force est le résultat du moment cinétique (S) engendré par la rotation de la toupie.

Si la toupie possède une charge électrique, à la force développée s'ajoute une force d'aimantation engendrée par le moment magnétique (M).

Les deux forces sont représentées par des données vectorielles.



a. Le spin H^+ :

Comme il tourne sur lui-même (toupie), il possède un moment cinétique appelé spin (S).

Étant chargé positivement, il possède de plus un moment magnétique (M) (en fait lié au spin) que l'on peut représenter comme un dipôle magnétique (assimilé à un petit aimant avec un pôle positif et négatif) et animé d'un mouvement de rotation.

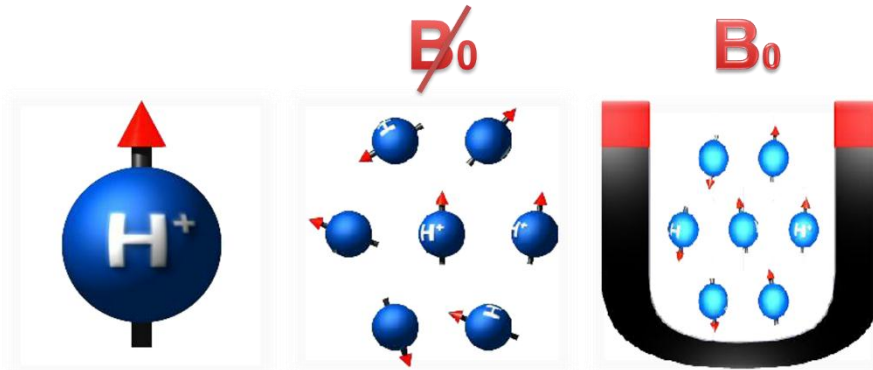
b. Notion de moment cinétique et magnétique :

i. Une particule qui tourne induit autour d'elle un moment cinétique ou « spin » aligné sur son axe de rotation représenté par un vecteur (S).

ii. Les protons (noyaux d'hydrogène) sont animés d'un mouvement de rotation (comme une toupie) et de plus portent une charge positive. Une charge qui tourne induit autour d'elle un champ magnétique appelé moment magnétique (lié au spin et également aligné sur son axe de rotation) et représenté par un vecteur d'aimantation « microscopique » noté (μ).

iii. Les protons peuvent donc être assimilés à de petits aimants (dipôles magnétiques) avec un pôle nord (N) et un pôle sud (S).

c. B_0 : Champ magnétique principal statique :



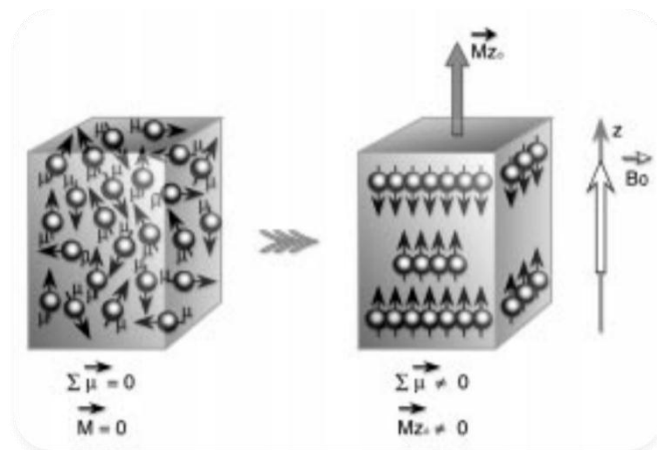
Dans la matière vivante, en l'absence de champ magnétique externe, l'orientation de l'aimantation de chaque proton est aléatoire. Dans cet état, l'aimantation de la matière est nulle.

Si l'on soumet la matière à un champ magnétique, les protons vont se répartir en deux populations sensiblement égales, parallèles ou antiparallèles à B_0 .

Les protons de sens parallèle correspondent aux protons de plus bas niveau d'énergie (E_1), les protons de sens antiparallèle correspondent aux protons de plus haut niveau d'énergie (E_2).

En fait, le champ magnétique résultant aura pour origine le très faible excès de protons de sens parallèle situé sur le niveau de basse énergie car les spins de sens opposé vont s'annuler deux à deux (M_z).

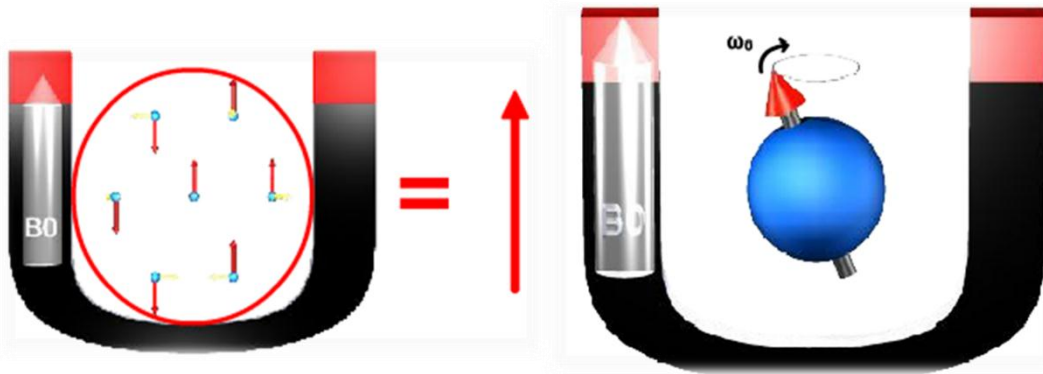
La différence de population des spins augmente proportionnellement avec l'intensité du champ magnétique statique B_0



Le champ magnétique résultant constitue le vecteur d'aimantation macroscopique M_z ; il est parallèle au champ principal B_0 et adopte un mouvement de rotation autour de son axe : c'est le mouvement de précession.

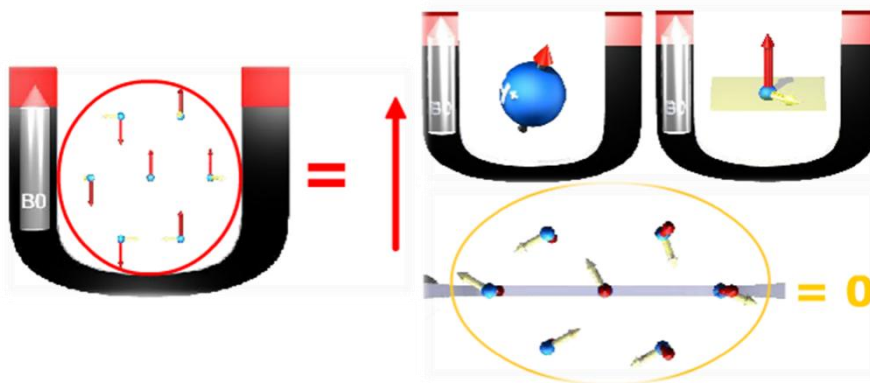
La fréquence de ce mouvement, ou fréquence de précession encore appelée fréquence de LARMOR est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique appliqué.

$$\omega_0 = \gamma B_0. (\gamma = \text{rapport gyromagnétique})$$



d. Action du champ magnétique principal B0 : Apparition de Mz0.

Les mouvements de précession des spins ne sont pas en phase : les composantes transversales microscopiques s'annulent et il n'y a donc pas d'aimantation transversale résultante.



2. Résonance et onde de radiofréquence :

La résonance est le transfert d'énergie entre deux systèmes oscillants à la même fréquence: L'onde de RF va entraîner un phénomène de résonance seulement si sa fréquence est la même que celle de précession des spins.

Elle va apporter de l'énergie au système de spins : c'est la phase d'excitation.

En fin d'excitation, le système va restituer l'énergie absorbée pour retourner à l'état d'équilibre de départ : c'est la phase de relaxation.

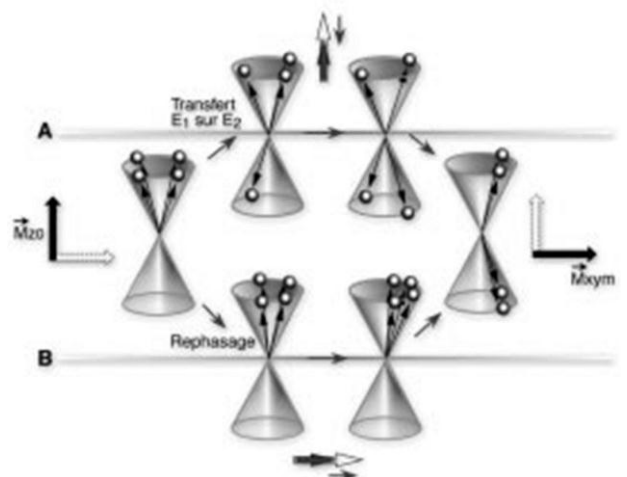
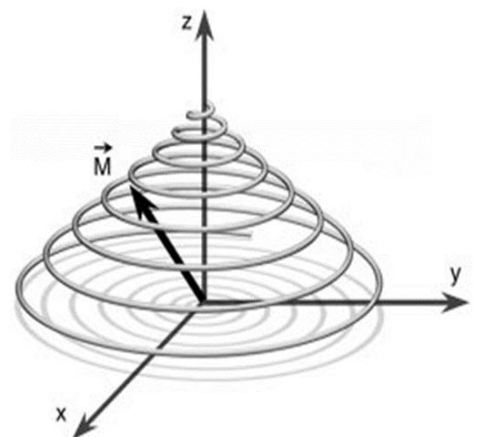
Le vecteur d'aimantation macroscopique Mz0 est très faible/B0 ; on ne peut pas le mesurer directement ; il faut donc le basculer à 90° : c'est là qu'intervient l'onde de radiofréquence B1.

on peut modifier l'orientation du vecteur d'aimantation à condition que la fréquence Wr de l'onde appliquée soit égale à la fréquence de précession du proton, Wo : c'est la condition de résonance (l'exemple d'une balançoire).

Lorsque cette condition de résonance est remplie, le vecteur bascule progressivement vers la composante transversale.

a. Excitation :

L'onde de RF, en fournissant de l'énergie au système, favorise le passage (transition) des spins parallèles de basse énergie, à l'état de spin antiparallèle de haute



énergie. Il résulte de ce phénomène une diminution de l'aimantation longitudinale M_z , voire une annulation de celle-ci lorsqu'il y a égalisation des deux populations.

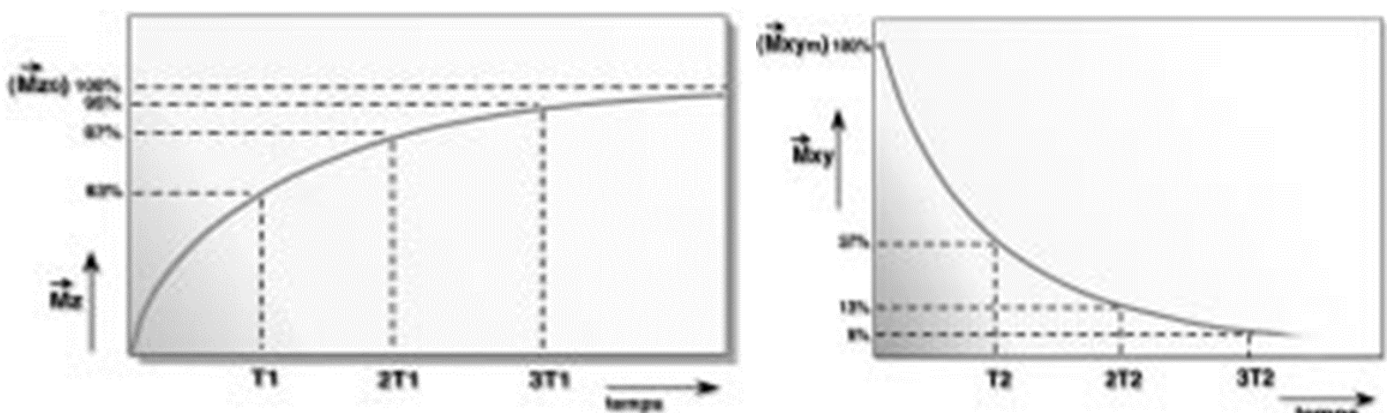
L'onde de RF a pour conséquence de mettre en phase les protons de la matière. Donc, elle induit l'apparition d'une composante transversale M_{xy} .

b. Relaxation : retour à l'équilibre

Dès la fin de l'excitation, les phénomènes inverses concernant l'aimantation longitudinale et l'aimantation transversale vont se produire, les spins retournent à leur état d'équilibre, c'est la relaxation.

Les spins qui s'étaient inversés retournent à leur état de spin parallèle sur le niveau de basse énergie. Cela conduit à une repousse de l'aimantation longitudinale : c'est la relaxation longitudinale encore appelée T_1 , qui est le temps nécessaire à la récupération d'environ deux tiers (63 %) de l'aimantation longitudinale.

Les spins qui avaient été mis en phase pendant l'impulsion de radiofréquence vont se déphaser. La composante transversale disparaît alors rapidement : c'est la relaxation transversale encore appelée T_2 qui est le temps nécessaire à la disparition d'environ deux tiers (63 %) de l'aimantation transversale.



3. Signal de résonance magnétique :

- T_1 est toujours supérieur à T_2 .
- T_1 et T_2 induisent la formation de l'image RM.

Pour mesurer la valeur de T_1 et T_2 , il faut accéder à la mesure des vecteurs d'aimantation longitudinale et transversale. Cela se fait à l'aide d'antennes qui transforment l'aimantation tissulaire en signal électrique (comme le fait une dynamo).

Un vecteur d'aimantation qui tourne induit un courant électrique dans une bobine (Faraday).

Le déphasage de l'aimantation transversale est mesurable directement.

La repousse de l'aimantation longitudinale, parallèle au champ principal B_0 est mesurable indirectement.

1. Enregistrement du signal :

On peut comparer un vecteur d'aimantation à un petit aimant. Un aimant qui tourne de manière perpendiculaire à une bobine crée un champ électrique mesurable que l'on peut représenter sous la forme d'une courbe sinusoïdale.

Les antennes en IRM remplissent le rôle de bobine. Elles peuvent être émettrices et/ou réceptrices. Elles ne peuvent recueillir que les variations du vecteur d'aimantation transversale car elles n'enregistrent que des moments magnétiques en mouvement.

III. Les séquences :

Chaque séquence est une subtile combinaison d'ondes de radiofréquence et de gradients.

Les objectifs à atteindre pour une séquence, quelle qu'elle soit, sont :

- Favoriser le signal de tel ou tel tissu (contraste).
- Le plus rapidement possible (vitesse)
- Limiter les artéfacts sans altérer le rapport signal / bruit.

1. Caractéristiques d'une séquence :

Les éléments indispensables à toute séquence d'imagerie sont :

- Une impulsion RF d'excitation, nécessaire au phénomène de résonance magnétique.
- Des gradients qui vont permettre le codage spatial (2D ou 3D), et dont l'agencement va déterminer la manière dont est rempli l'espace K.
- Une lecture du signal, qui peut combiner un ou plusieurs types d'échos (écho de spin, de gradient...) déterminant le type de contraste .

2. Classification des séquences :

a. En fonction du mode d'acquisition :

Il existe deux grandes familles de séquences, en fonction du type d'écho enregistré :

- Les séquences d'écho de spin, caractérisées par la présence d'une impulsion RF de 180° de rephasage
- Les séquences d'écho de gradient

i. **Echo de spin** : La plus utilisé en IRM.

Constituée de deux impulsions radiofréquence :

- La première à 90°
- La deuxième à 180° séparées par un intervalle de temps T.

TR: temps de répétition : temps qui sépare deux impulsions 90°.

TE: temps d'écho : temps qui sépare la première impulsion 90° du 1^{er} écho

La séquence d'écho de spin en densité de protons (DP)

La séquence d'écho de spin en densité de protons a des paramètres TR et TE optimisés pour minimiser à la fois l'influence du T2 et du T1.

Le contraste obtenu sera fonction de la densité en noyaux d'hydrogène (c'est à dire en protons).

ii. **Echo de gradient** :

- Obtenir une réduction du temps d'acquisition.
- Angle de bascule inférieur à 90°.
- Pas d'impulsion 180°.
- Echo créé à l'aide de gradient.
- Les paramètres sont : angle de bascule, TR, TE.

iii. **Séquences Inversion / récupération** :

La séquence d'inversion-récupération permet de réaliser sur une séquence T2

- Suppression du signal de l'eau (séquence FLAIR).
- Suppression du signal de la graisse (séquence STIR).

Le contraste est celui d'un T2 et les lésions apparaissent généralement hyperintenses.

b. En fonction du but de la séquence :

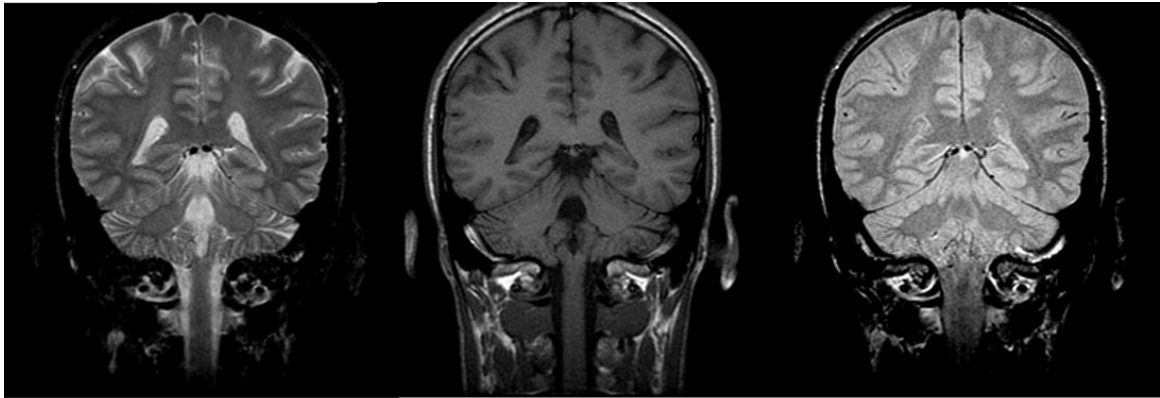
i. **Séquences morphologiques** : T1, T2, FLAIR, STIR, T2*, DP...

ii. **Séquences fonctionnelles** :

- **Diffusion** :
- **Perfusion** :
- **Spectroscopie** :
- **Tenseur de diffusion et tractographie** :
- **IRM de flux** :
- **IRM d'activation** :

3. Contraste en IRM :

En fonction des paramètres d'acquisitions, TR, TE, angle etc... Les différentes structures anatomiques sont visualisées selon différents contrastes ce qui permet une possibilité de caractérisation lésionnelle



TR/TE 2500/90
Pondérée T2

TR/TE 460/11
Pondérée T1

TR/TE 2500/30
Densité de proton

IV. Formation de l'image IRM :

Le signal RMN est enregistré après les différentes étapes de la séquence employée, y compris le codage spatial. Ce signal doit être numérisé (convertisseurs analogique-numérique) puis être traité de façon numérique pour former l'image.

V. Appareillage et sécurité :

- Local technique
- Salle de préparation
- Salle d'examen
- Consoles d'acquisition et de traitement

1. Salle de préparation :

- Brancards amagnétiques.
- Pieds à perfusion amagnétiques.
- Table amagnétique.
- Module ECG.
- Matériel paramédical.

2. Salle d'examen :

- Avant d'entrer dans la salle, s'enquérir au préalable des éventuelles **CONTRE - INDICATIONS +++**
- **Champ magnétique intense :**
 - Tous les accessoires à proximité composés de matériaux non ferromagnétiques (bois, aluminium et pvc).
 - **Les objets ferromagnétiques peuvent devenir des projectiles => retirer systématiquement tous ces objets.**
 - **Tout objet ferromagnétique perturbe l'homogénéité du champ B_0 et peut induire des artefacts sur l'image.**
 - Recouverte d'un blindage en feuille de cuivre afin de protéger le système de radiofréquence des perturbations RF externes : la cage de Faraday.
 - Tout le matériel dans la salle de l'aimant doit être amagnétique.
- **L'Aimant :**
- **Matériels de réanimation.**



- **Antennes** : Deux types
 - **Emettrices/réceptrices** : Ce sont des antennes de volume, tête, genou et corps entier. Le signal est homogène sur tout le volume.
 - **Réceptrices ou de surfaces (ou endocavitaire)** L'antenne corps entier est émettrice. On applique ces antennes le plus près possible de la région à explorer.
- **Console** :
 - Console d'acquisition
 - Console d'interprétation

VI. Contres indications de l'IRM :

Vu l'évolution continue du matériel médical, les contre-indications de l'IRM sont de plus en plus restreintes. Le patient doit se munir d'un document confirmant le model exact d'un éventuel matériel biomédical implanté. La contre-indication de ce matériel à l'IRM peut être vérifiée sur des sites spécialisés (exemple www.mrisafety.com).

En règle générale, les contre-indications à l'IRM sont :

1. Contre-indications absolues

- Stimulateurs cardiaques.
- Défibrillateurs automatiques internes.
- Bio stimulateurs (nerfs, croissance osseuse),
- Électrodes épocardiques.
- Pompes à perfusion implantées.
- Implants mammaires avec extenseurs de tissu.
- Corps étrangers métalliques oculaires

2. Contre-indications relatives

- Clips vasculaires cérébraux (anévrisme)
- Valve cardiaque artificielle
- Prothèse de l'oreille moyenne
- Implants cochléaires / prothèses auditives de l'oreille interne
- Filtres à veine cave
- Prothèses endovasculaires
- Eclats d'obus, corps étrangers

VII. Conclusion :

- L'IRM repose sur le principe de la résonance magnétique nucléaire (RMN) qui utilise les propriétés quantiques des noyaux atomiques.
- La reconnaissance des contre-indications et l'application rigoureuse des mesures de sécurité sont primordiales.
- L'examen IRM comporte plusieurs séquences qui visualisent le même segment anatomique selon différents contrastes.
- Il existe des séquences morphologiques et des séquences fonctionnelles.
- L'examen IRM est long est astreignant pour le patient d'où la nécessité de cibler le but diagnostique de l'examen.