

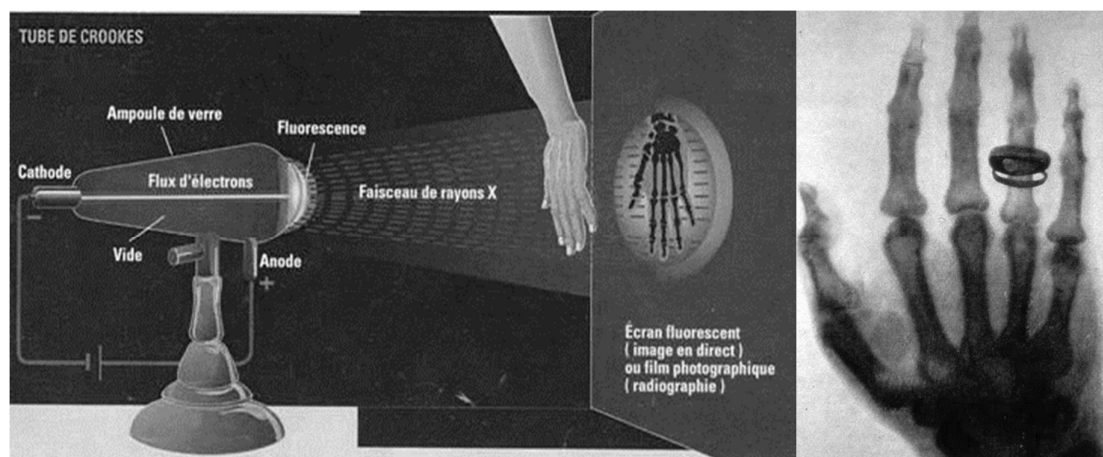
# Chapitre 3

## L'imagerie médicale

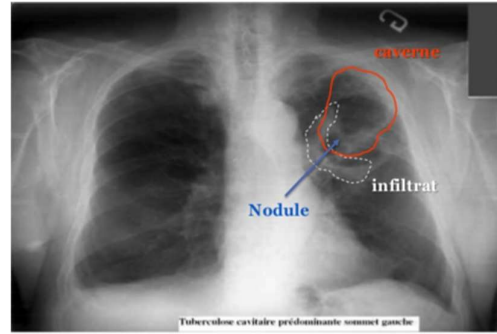
### Physique appliquée dans le domaine biomédical

#### 1) Découverte des Rayons X

Les premiers instruments sont nés de la découverte des **rayons X** par **Wilhelm Röntgen**, physicien allemand, en **1896**. Les rayons X traversent le corps humain en étant plus ou moins absorbés selon la **densité des tissus** pénétrés : **les os sont plus opaques que les muscles**, comme le montre la première radiographie que le physicien fit de la main de sa femme.



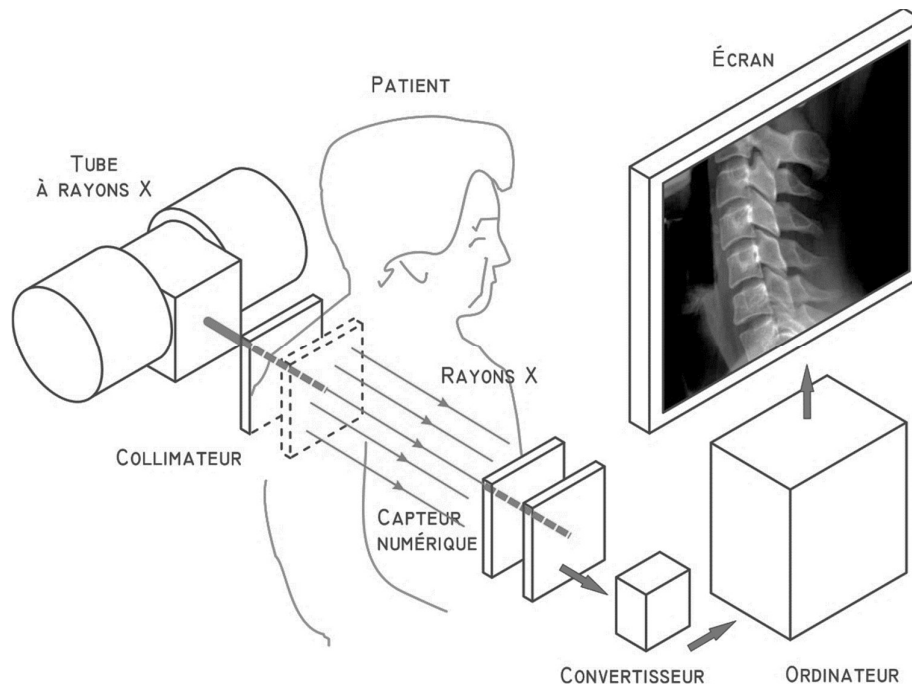
Très vite apparaît l'intérêt d'une telle découverte pour la médecine : explorer le corps humain sans l'ouvrir. Le **dépistage de la tuberculose** par radioscopie des poumons se basait sur ce principe. Cette technique est encore exploitée pour déceler des fractures ou des tissus endommagés par une maladie.



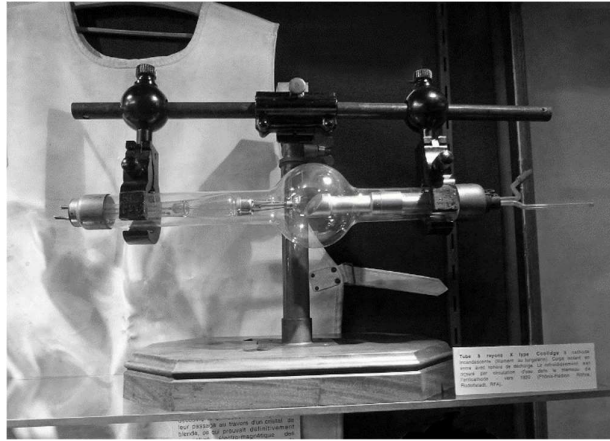
A gauche : image radiographique mettant en évidence la fracture de l'humérus gauche. A droite : image d'un nodule pulmonaire (lésion au niveau du tissu pulmonaire).

## 2) Principe de la radiographie

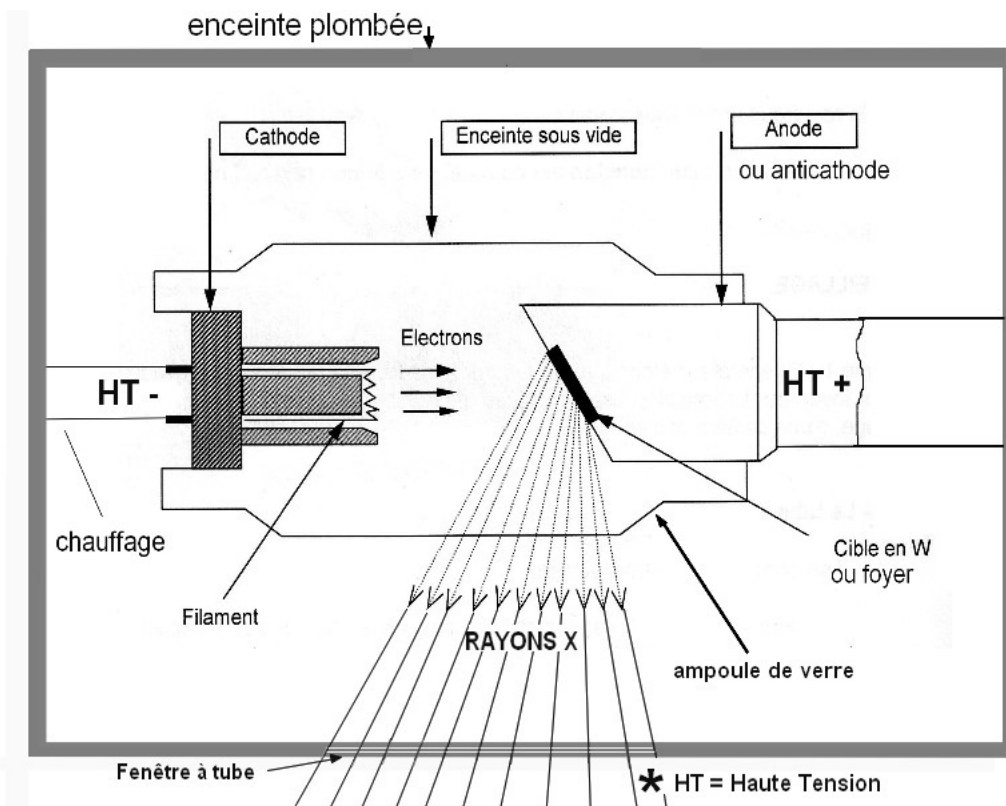
Une **source émettrice de rayons X** et un **détecteur** sont placés de part et d'autre de la partie du corps à étudier et à radiographier fournissent une photographie. Le **scanner** repose sur le **même principe**. La **rotation simultanée de la source et du détecteur** permet d'obtenir plusieurs projections à partir desquelles sont reconstruites des **images 3D**.

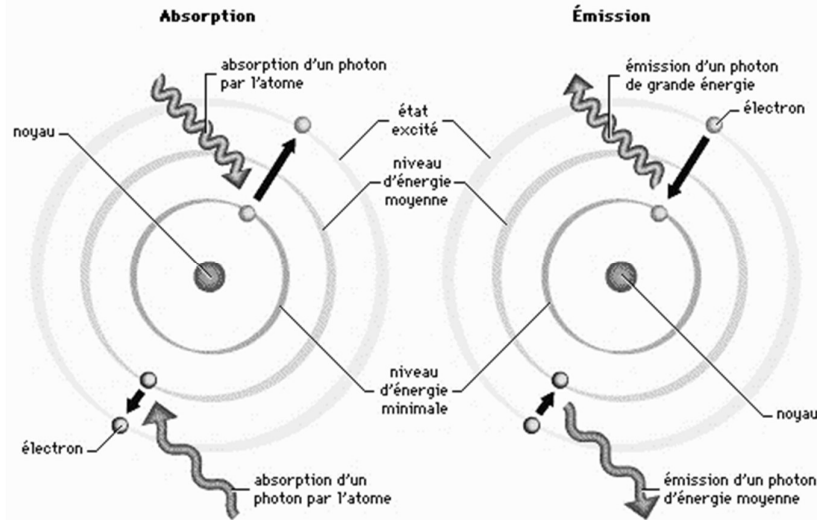


### 3) Tube à Rayons X

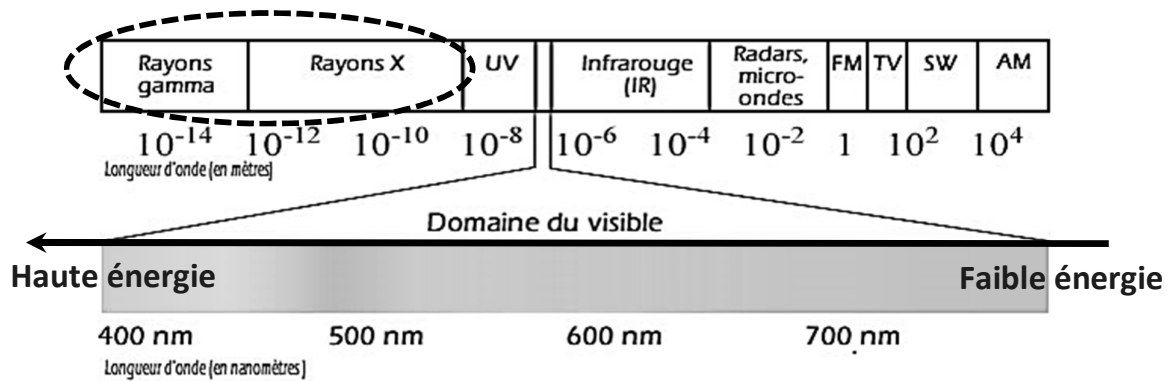


La production des Rayons X se fait par chauffage d'un filament métallique, la **cathode (-)**. Des **électrons** sont ensuite **expulsés et accélérés** dans un champ électrique créé grâce à une **différence de potentiel** appliquée dans un **tube sous vide**. Ce faisceau d'électrons est focalisé de manière à bombarder une cible métallique en tungstène appelé l'anode ou l'**anticathode (+)**. Le freinage des électrons par les atomes de la cible provoque ainsi **l'émission d'un rayonnement continu de Rayons X**.





Lors l'impact des électrons, les **atomes** de l'anticathode sont **excités**. Les **électrons internes** de ces atomes passent sur des **couches électroniques supérieures** ou plus lointaines par rapport au noyau atomique. La phase d'**excitation** se suit par une phase de **relaxation** où les électrons « excités » reviennent sur les couches électroniques initiales. Cela s'accompagne d'une **émission d'énergie** sous la forme d'ondes électromagnétiques telles que des Rayons X.



- Synthèse :**
1. Les rayons X sont produits par un générateur X ou **tube à RX**. On chauffe une cathode. Elle émet des **électrons** qui sont **accélérés** par une haute tension électrique.
  2. En **bombardant la plaque de tungstène** (l'anticathode), les **électrons excitent transitoirement les atomes de la plaque**. Le retour à un état stable de ces atomes **entraîne l'émission de Rayons X**
  3. Les **clichés** sont **formés en irradiant l'organe** par des **Rayons X**. Les **photons** (les rayons) **qui traversent l'organe sont arrêtés par un détecteur** placé de l'autre côté.

#### 4) Le coefficient d'absorption des Rayons X

La notion fondamentale en radiographie est celle de densité. La **densité** est une grandeur physique qui **dépend du coefficient d'absorption** (ou d'atténuation) des rayons X par chaque tissu. Ce coefficient d'absorption **varie en fonction de la composition chimique du tissu**. Il est **élevé pour** les tissus composés d'atomes à numéro atomique élevé, comme l'**os**, contenant du **calcium**. Il est plus **faible pour les tissus mous** composés principalement d'oxygène, de carbone, d'hydrogène ou d'azote, atomes à numéro atomique bas. Les **rayons X** sont **fortement atténués par un tissu qui possède un coefficient d'absorption élevé**.

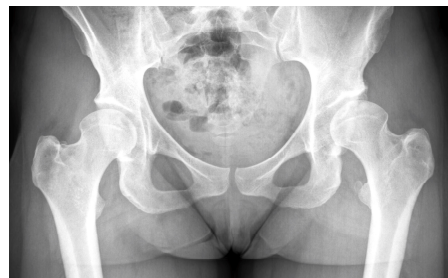
#### 5) La numérisation

La numérisation est une conversion d'un signal analogique (il s'agit de l'image du tissu observé) en une suite de nombres permettant de représenter cette image informatiquement.

La numérisation peut être :

- **Primaire** : l'image obtenue est directement une image numérique (sans passer par une image analogique).
- **Secondaire** : l'image analogique est convertie secondairement en image numérique.

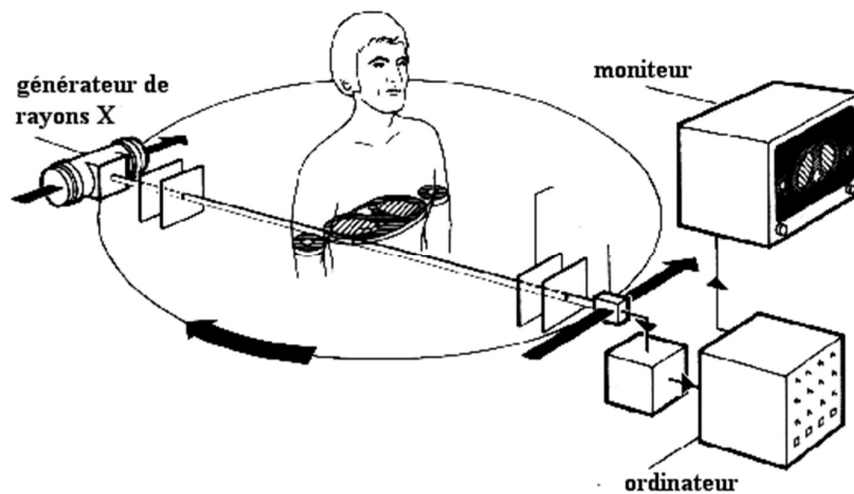
L'image radiographique est une image en **niveaux de gris**. Ces différents niveaux de gris correspondent à des différences d'atténuation du faisceau de Rayons X. Ils représentent donc des densités différentes (parfois appelées tonalités). On identifie deux types de structure sur une radiologie : **les opacités et les clartés**. Type de structure :



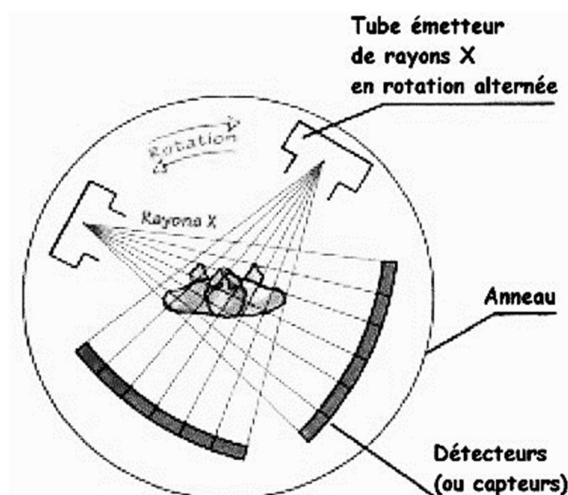
- **Opacité** : Plus **forte absorption des rayons X** que les tissus environnants et donc **structure plus blanche** que le tissu environnant (les os).
- **Clarté** : Plus **faible absorption des rayons X** que les tissus environnants et donc **structure plus noire** que le tissu environnant (les organes).

## 6) Le principe du scanner (tomodensitométrie)

Le principe du tomodensitomètre est d'effectuer de **multiples projections sous différents angles**. En d'autres termes, il s'agit de la **rotation simultanée de la source des RX et du détecteur** permet d'obtenir plusieurs projections à partir desquelles sont **reconstruites des images**. En effet la numérisation des images obtenues permet d'une part de transporter facilement ces informations sur un réseau d'ordinateur, d'autre part le médecin qui examine le résultat du scanner a la possibilité de « zoomer » afin de mettre en relief certaines zones.



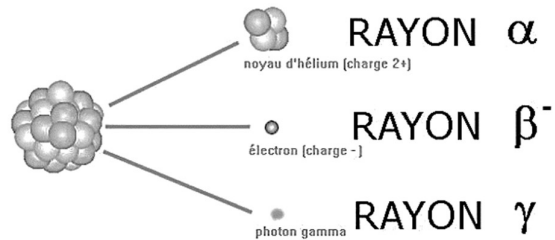
En mettant bout à bout un grand nombre de coupes à l'aide d'un ordinateur, ce dernier a la capacité d'afficher une **image tridimensionnelle (3D)** du corps examiné permettant un **examen médical approfondi et complet**, le médecin ayant accès au **moindre détail de chaque organe**. Il s'agit d'un avantage qu'il ne possède pas avec une simple radiographie.



## 7) L'imagerie nucléaire d'émission

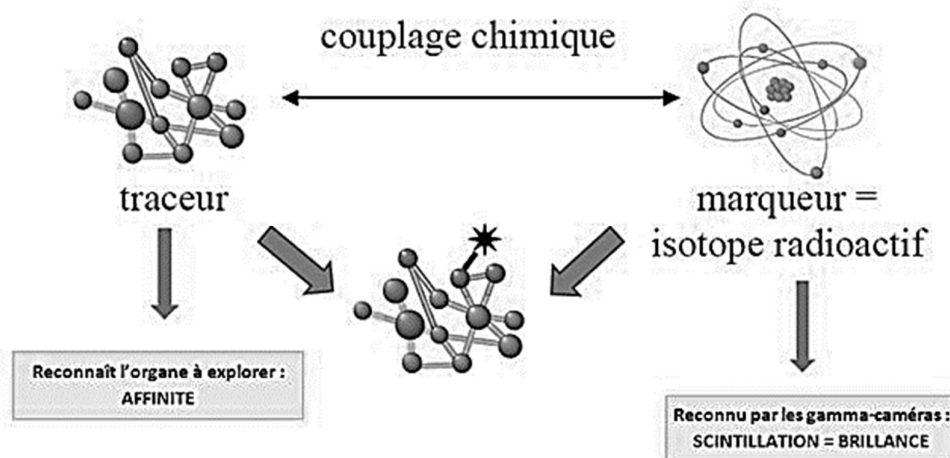
En 1934, la découverte de la **radioactivité artificielle** par Frédéric et Irène Joliot-Curie, physiciens et chimistes français, ouvre la voie au développement des radioéléments de courte durée de vie.

Des **radioéléments** sont des substances qui **émettent de la radioactivité** comme des **particules  $\alpha$** , **particules  $\beta^-$**  et des **rayonnements gamma  $\gamma$**  (R $\gamma$ ).



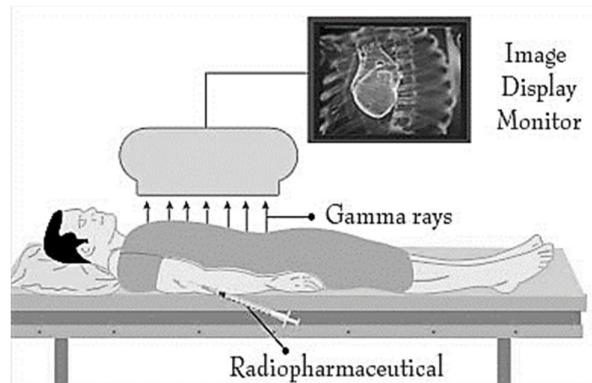
Au lieu d'irradier le corps par des Rayons X et de récolter les rayons non absorbés par les tissus, ici, **on injecte dans le corps un traceur radioactif** qui se fixera sur les tissus biologiques à étudier et **qui émettra des rayons de l'intérieur vers l'extérieur du corps**. Le **signal sera ensuite analysé** par un détecteur qui constituera une **image tridimensionnelle (3D)** de l'organe.

On appelle **radiopharmaceutique** le traceur radioactif injectable à l'homme. Dès son incorporation dans le corps, son « parcours » sera suivi. Ainsi le fonctionnement des organes sera étudié de manière non invasive (comme le métabolisme du glucose par exemple).



## 8) Le principe de la scintigraphie ou TEMP (Tomographie par émission monophotonique)

La **scintigraphie** fait partie des techniques d'imagerie médicale qui repose sur l'**injection d'une substance faiblement radioactive** dans l'organisme. Cette substance est conçue pour **se fixer préférentiellement sur un organe ou une tumeur**. Elle permet de suivre l'activité d'un organe bien spécifique (par exemple le cerveau ou le cœur).

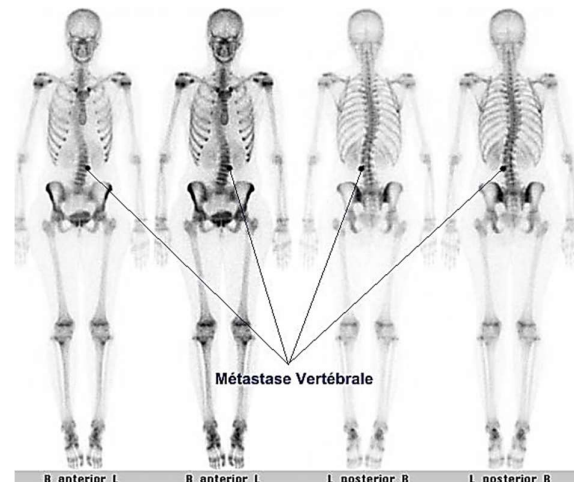


La **scintigraphie (TEMP)** ou tomographie par émission monophotonique est une technique d'imagerie médicale qui consiste à **injecter un traceur radioactif** le plus souvent par voie intraveineuse. Lorsqu'il **se fixera sur l'organe** à visualisé, le traceur **émettra des rayons gamma (R $\gamma$ )**. Ces photons traversent le corps du patient puis sont analysés par un détecteur bien particulier : la **gamma-caméra**. Ce détecteur tourne autour du corps du patient et les informations obtenues sont étudiées pour constituer une image tridimensionnelle (3D).

**Cette technique peut déceler des régions de forte activité cellulaire comme par exemple des tumeurs.**

A droite :

**Scintigraphie osseuse : détection de métastase vertébrale.**

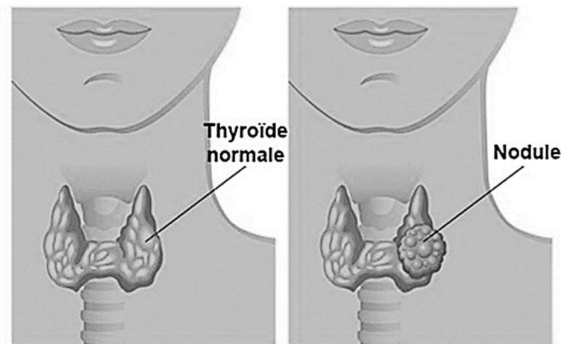




### Exemple : La scintigraphie thyroïdienne

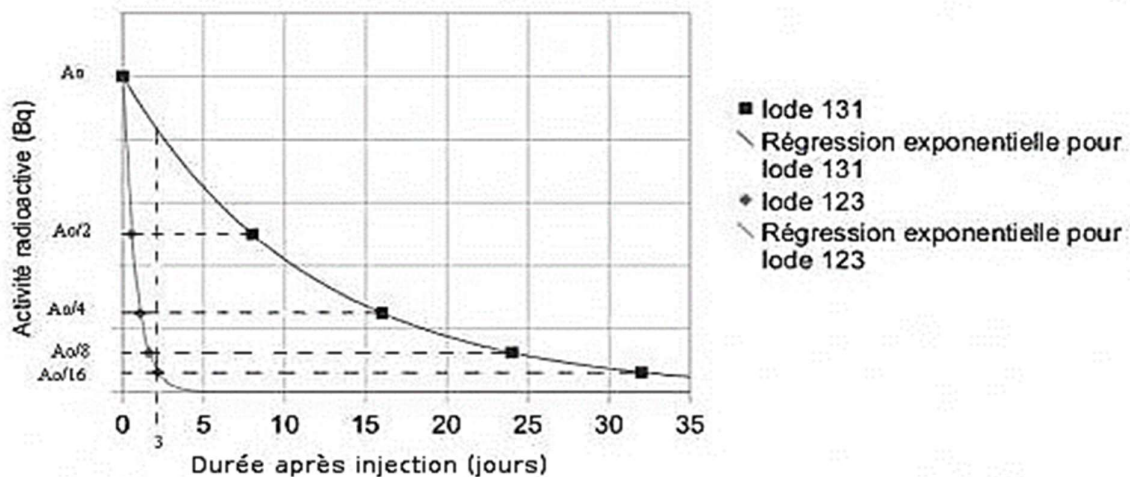
La scintigraphie thyroïdienne permet d'étudier la structure de la **glande thyroïde** et d'en observer le fonctionnement. La scintigraphie thyroïdienne est généralement prescrite dans le cadre d'un **bilan d'hyperthyroïdie** ou suite à la découverte de **nodules thyroïdiens**. La scintigraphie thyroïdienne est un examen permettant d'étudier la structure de la glande thyroïde et d'en observer le fonctionnement. Les **isotopes** radioactifs utilisés sont des émetteurs de rayonnement gamma (comme l'**iode 123** ou **131**).

### Nodule thyroïdien



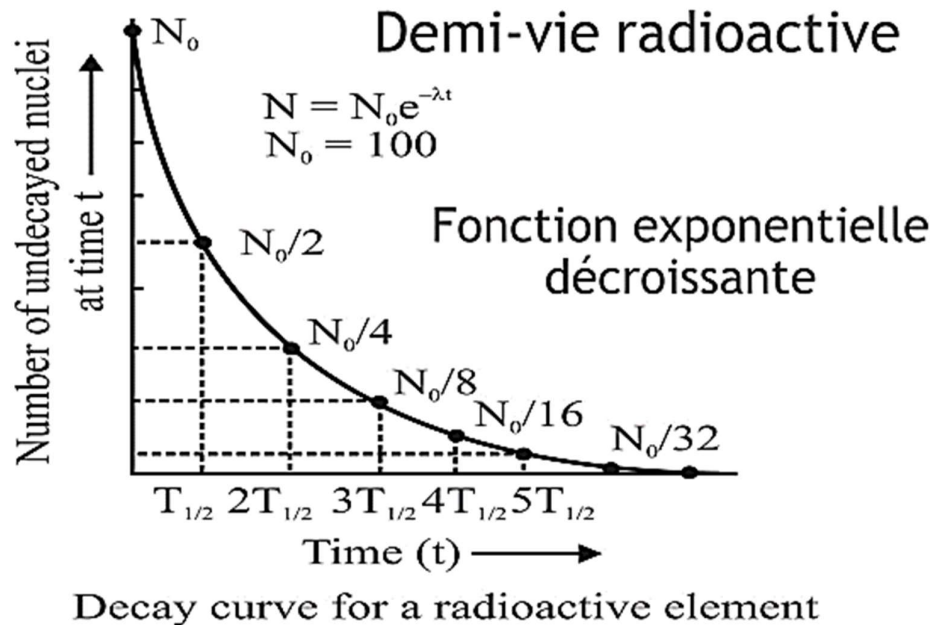
Les radioéléments utilisés pour le diagnostic médical **sont choisis selon plusieurs critères** : délivrer **une dose d'irradiation la plus faible possible**, posséder **une durée de vie radioactive courte** et émettre un rayonnement **décelable à l'extérieur** du corps.

Courbe de période de l'iode 123 et 131



## 9) Temps de demi-vie des radioéléments

La **demi-vie d'un isotope radioactif**  $t_{1/2}$  est la **durée** nécessaire pour que la **moitié des radioéléments** en présence à l'instant initial **se soient transmutés**.



On peut montrer que le nombre d'atomes  $N$  restant à l'instant  $t$  est : (loi de la désintégration radioactive).

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{0,693}{t_{1/2}}$$

Avec :  $N$ , le nombre d'atomes restant à l'instant  $t$

$N_0$ , le nombre d'atomes en  $t = 0$

$\lambda$ , constante de désintégration ( $s^{-1}$ )

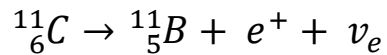
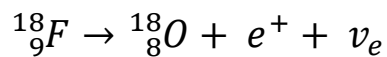
Cette fonction est **une fonction exponentielle décroissante**. La valeur de  $\lambda$  varie selon les isotopes et plus  $\lambda$  est grand, plus le taux de désintégration est élevé.

## 10) Tomographie par émission de positons<sup>1</sup> (TEP) ou PET-SCAN

La TEP est principalement utilisée dans le domaine de la cancérologie comme le dépistage des tumeurs ou suivi d'une thérapie en cours. Il est également possible d'étudier certaines pathologies comme les maladies cardiovasculaires ou neurologiques. Les radioéléments utilisés dans cette technique sont notamment les isotopes **Fluor-18** et **Carbone-11** émetteurs de positons.

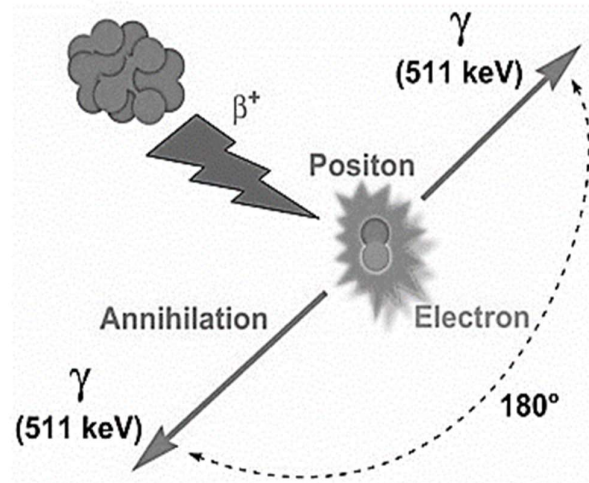
### Qu'est-ce qu'un positon ?

Le positon (ou positron ou encore antiélectron) est une **particule ayant la même masse qu'un électron** mais de **charge relative de +1**. Le positon tourne dans le même sens de rotation que l'électron (**même « spin »**). Il peut être obtenu par **désintégration  $\beta^+$** .



*$e^{+}$  symbole du positon et  $\nu_e$  symbole du neutrino électronique<sup>2</sup>*

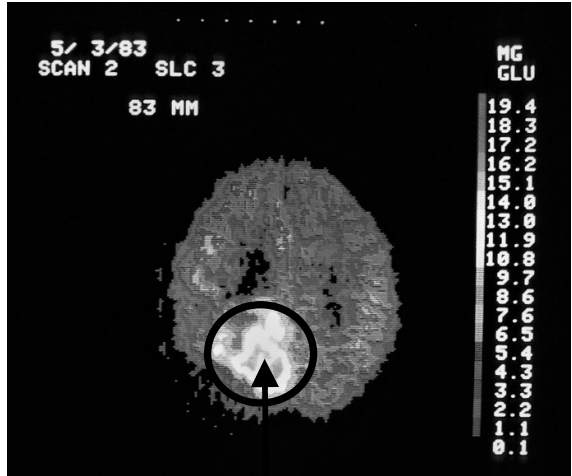
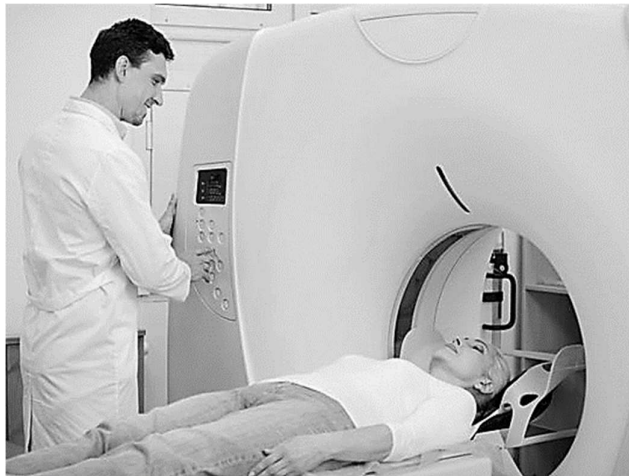
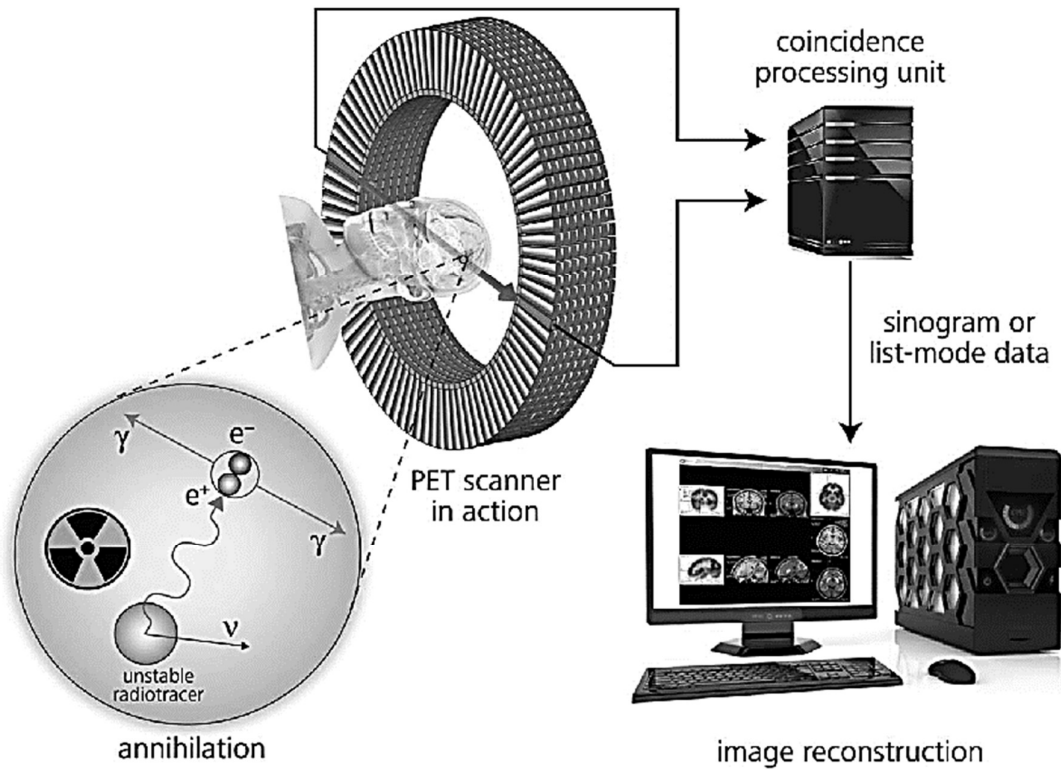
Les **positons émis se combinent avec des électrons environnants** et s'annihilent en **émettant deux photons** dans des **directions diamétralement opposées**. Une **couronne de détecteurs**, situés de part et d'autre de la région cible, captent ces photons. Après traitement informatique, les paires de photons détectées, pendant un intervalle de temps donné, permettent de reconstruire les images de la zone explorée par "tranches" de quelques millimètres d'épaisseur.



<sup>1</sup> Selon la Commission Électrotechnique Internationale, « positon » est le terme français par défaut ; cependant « positron » (qui est l'appellation anglophone) peut aussi être employé.

<sup>2</sup> Dans la physique des particules, le neutrino électronique ou neutrino-électron correspond à une particule élémentaire sans charge électrique.

### Schéma de principe du PET-SCAN



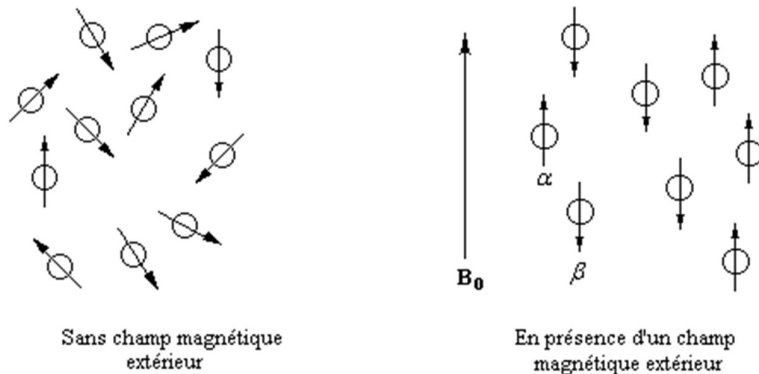
Mise en évidence d'une **tumeur cérébrale** par la technique de PET-SCAN

## 11) Imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM)

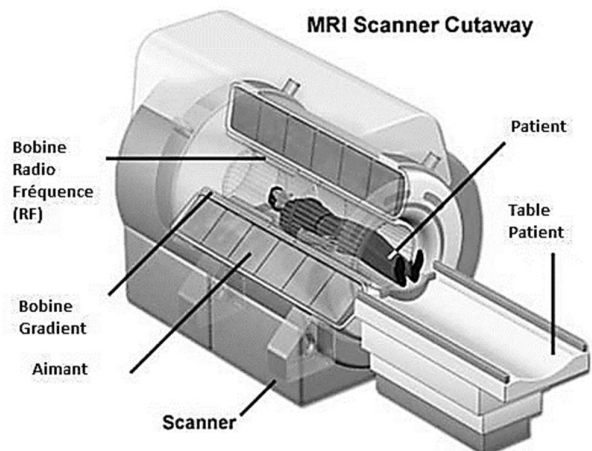
L'IRM repose principalement sur les **propriétés magnétiques des atomes d'hydrogène**, très abondants dans le corps humain en grande partie sous forme d'eau et dont le noyau possède **un moment magnétique**. Par conséquent, **les atomes d'hydrogène s'alignent le sens d'un champ magnétique extérieur** tout comme l'aiguille d'une boussole par rapport au champ magnétique terrestre.

☺ **Champ magnétique** : région de l'espace soumise à l'action d'une force magnétique provenant d'un aimant.

*Ex : Force d'attraction d'un aimant s'exerçant sur une aiguille*



Lorsque le patient est placé dans un **champ magnétique extérieur puissant  $B_0$** , les atomes **d'hydrogène s'orientent et s'alignent** suivant ce champ magnétique. Il s'agit d'une **phase d'excitation**. Lorsque le champ magnétique  $B_0$  cesse, les **atomes d'hydrogène se désynchronisent** et restituent l'énergie absorbée lors de la phase d'excitation. Cette **phase de relaxation** s'accompagne de l'émission d'une onde électromagnétique caractéristique captée par un détecteur dont l'analyse fournit des **images 3D** des organes explorés. En d'autres termes, le **patient est placé dans un énorme aimant** et soumis à l'action de son champ magnétique.

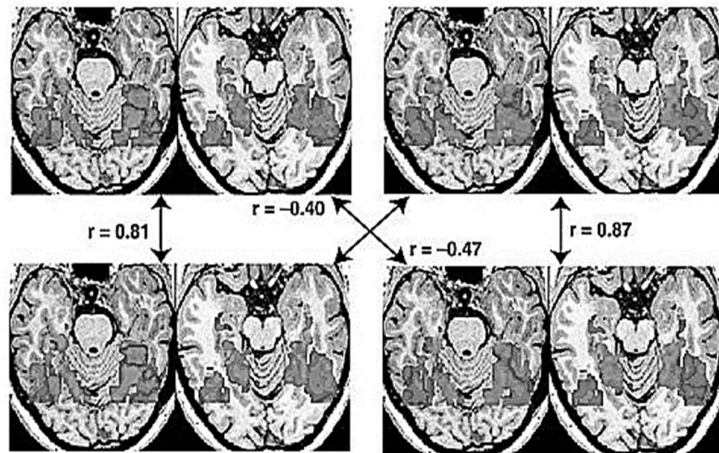


Avec cette technique d'imagerie, les chercheurs peuvent **étudier finement les tissus "mous"** : cerveau, moelle épinière, muscles... en **connaître la structure, détecter des tumeurs cancéreuses** - c'est **l'IRM anatomique**. L'IRM ne permet pas seulement d'étudier la morphologie des organes, elle permet de suivre **le fonctionnement du cerveau (l'IRM fonctionnelle)** et de connaître **l'organisation tissulaire (c'est l'IRM de diffusion)**.

**Synthèse :**

Imagerie par résonance magnétique nucléaire	
IRM anatomique	Détermination de la structure des tissus : cerveau, moelle épinière... par la visualisation des organes sous forme d'images 2D ou 3D de l'intérieur du corps de façon non invasive avec une résolution en contraste relativement élevée.
IRM fonctionnelle Cérébrale	Technique mesurant <i>in vivo</i> l'activité des aires du cerveau en détectant les changements locaux de flux sanguin.
IRM de diffusion	L'IRM de diffusion explore les micromouvements des molécules d'eau dans les organes à étudier. Elle permet d'étudier <i>in vivo</i> la microstructure des tissus. Elle donne des indications sur d'éventuelles anomalies des fibres nerveuses de la substance blanche ou de la moelle épinière non visibles en imagerie conventionnelle.

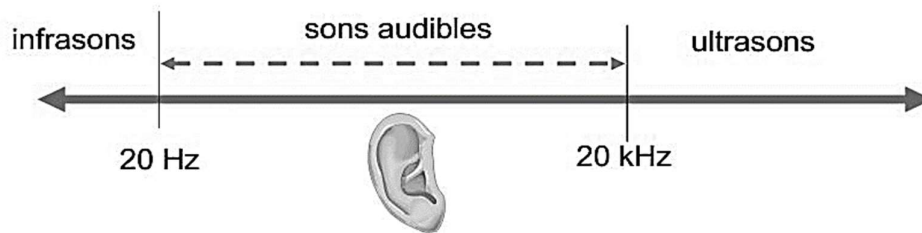
A droite : clichés du cerveau en IRM fonctionnelle cérébrale.



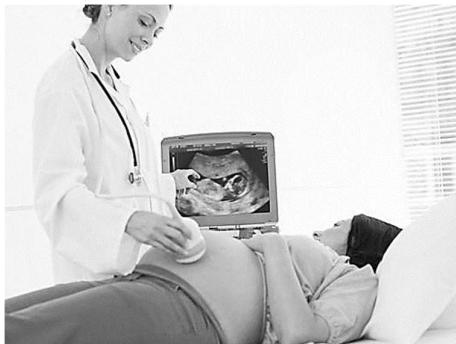
## 12) L'échographie ultrasonore

L'échographie est une technique d'imagerie médicale qui utilise des ultrasons. Ce sont des ondes acoustiques (des sons) de haute fréquence qui ne sont pas audibles. Comme il ne s'agit pas d'ondes électromagnétiques de haute fréquence, l'échographie est un examen qui n'est pas dangereux ni pour le patient ni pour le médecin.

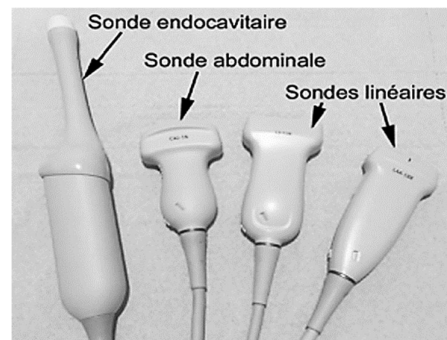
☺ **Les ultrasons** : Ondes mécaniques dont la propagation nécessite un support tel qu'un fluide, un solide ou un gaz. La gamme de fréquences des **ultrasons** se situe entre 20 et 10 000 Kilohertz (kHz), trop élevées pour être perçues par l'oreille humaine.



L'élément de l'appareillage le plus important est la sonde émettrice des ultrasons. La sonde envoie des ondes sonores dans le corps. Chaque fois que les ondes rencontrent une structure, elles se réfléchissent sur celle-ci et reviennent à nouveau à la sonde sous forme d'un écho. C'est cet écho qui va former l'image.



Nous pouvons distinguer les sondes « échographiques convexes » placées sur la peau pour des observations superficielles et des sondes « endocavitaires » passant dans les orifices naturels (vagin et rectum). Pour améliorer la transmission des ultrasons, on utilise du gel entre la peau et la sonde.



## Table des matières

Découverte des Rayons X.....	1
Principe de la radiographie.....	2
Tube à Rayons X.....	3
Le coefficient d'absorption des Rayons X.....	4
La Numérisation.....	4
Le principe du scanner (tomodensitométrie).....	6
L'imagerie nucléaire d'émission.....	7
Le principe de la scintigraphie (TEMP).....	8
La scintigraphie thyroïdienne.....	9
Temps de demi-vie des radioéléments.....	10
Tomographie par émission de positons (TEP) ou PET-SCAN.....	11
Schéma de principe du PET-SCAN.....	12
Imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM).....	13
L'échographie ultrasonore.....	14