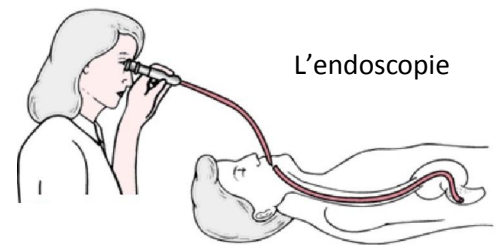


Introduction à l'imagerie médicale :

L'imagerie médicale regroupe les moyens d'acquisition et de restitution d'images du corps humain à partir de différents phénomènes physiques tels que : l'absorption des rayons X, la résonance magnétique nucléaire, la réflexion d'ondes ultrasons ou la radioactivité.

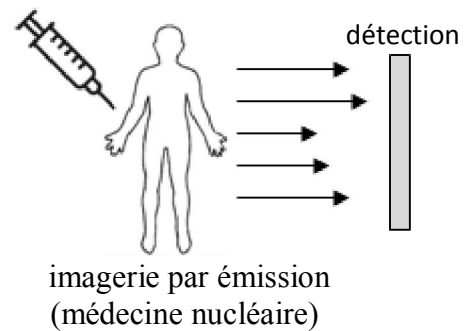
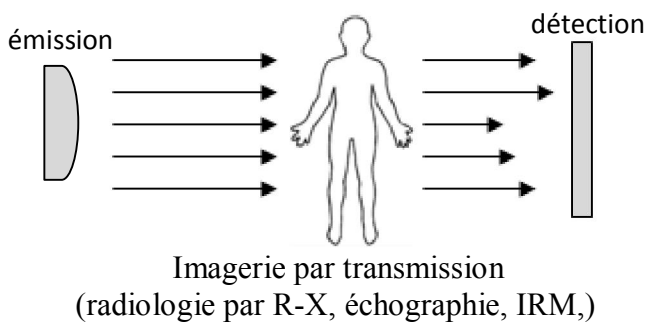
Les techniques de l'imagerie médicale sont considérées surtout comme outil diagnostique, elles sont aussi largement utilisées dans la recherche biomédicale.

On associe parfois à l'imagerie médicale les techniques d'imagerie optique comme l'endoscopie.



On peut classer ces techniques en deux grandes familles :

- Imagerie de transmission : le rayonnement ou faisceau externe traverse le patient. Par exemple : radiologie par X, scanner, échographie, IRM,...
- Imagerie d'émission : le rayonnement vient du patient après l'injection du traceur (isotope). Exemple : les techniques de la médecine nucléaire.



L'imagerie médicale est une science récente. Parmi les grands repères qui marquent son évolution, on cite :

- 1895 : Découverte des rayons X par Roentgen et première radiographie
- 1955 : Mise au point de la visualisation du corps humain par des ultrasons (échographie).
- 1972 : visualisation du corps humain en coupes grâce aux rayons X et à l'ordinateur (scanner X) par Hounsfield.
- 1973 : Mise au point de la visualisation du corps humain par l'IRM, grâce aux champs magnétiques, aux ondes radios et à l'ordinateur, par Lauterbur et Damadian.
- 1990 : développement de la médecine nucléaire.

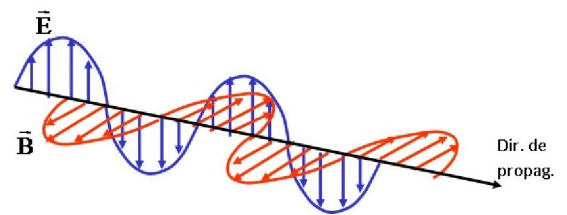
Chapitre 1 : Imagerie par les Rayons X

1.1. Principes d'imagerie par les rayons X :

Les rayons X ont été découverts en 1895 par le physicien allemand Wilhelm Röntgen. Ce rayonnement était alors inconnu, Röntgen leur donna ainsi le nom de rayons X. Les rayons X sont, comme la lumière, une forme de rayonnement électromagnétique. Ils se déplacent dans le vide à la vitesse de la lumière $c=300.000 \text{ km/s}$. Ils sont de haute énergie, très pénétrants et ionisant (ils sont nocifs pour la santé).

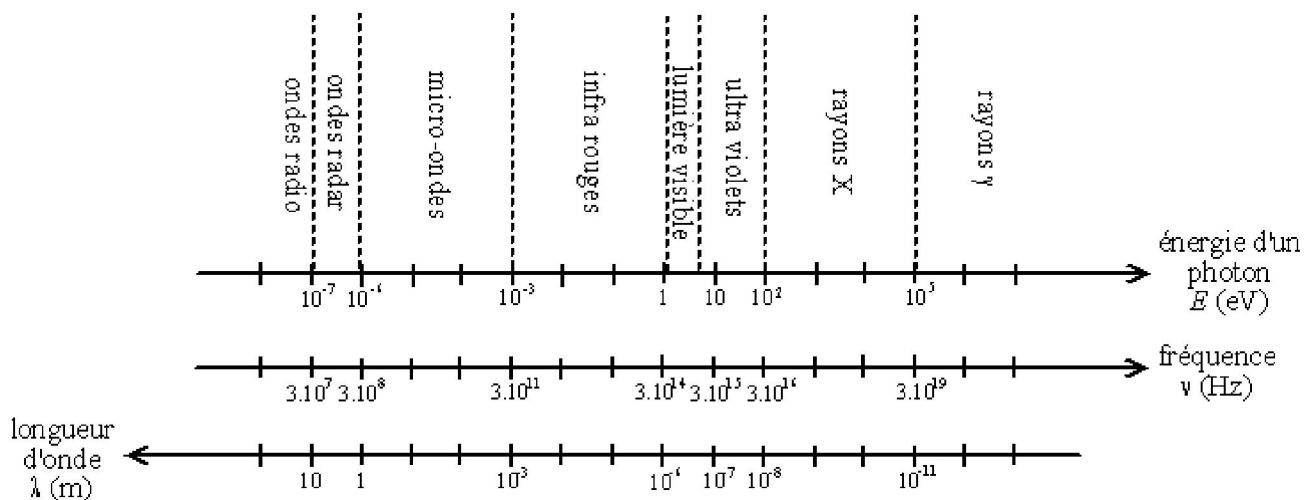
1.1.1. Rappel sur le rayonnement électromagnétique :

Un rayonnement (ou une onde) électromagnétique consiste en la propagation d'un champ électrique E et d'un champ magnétique B perpendiculaires, et sont eux-mêmes perpendiculaires à la direction de propagation.



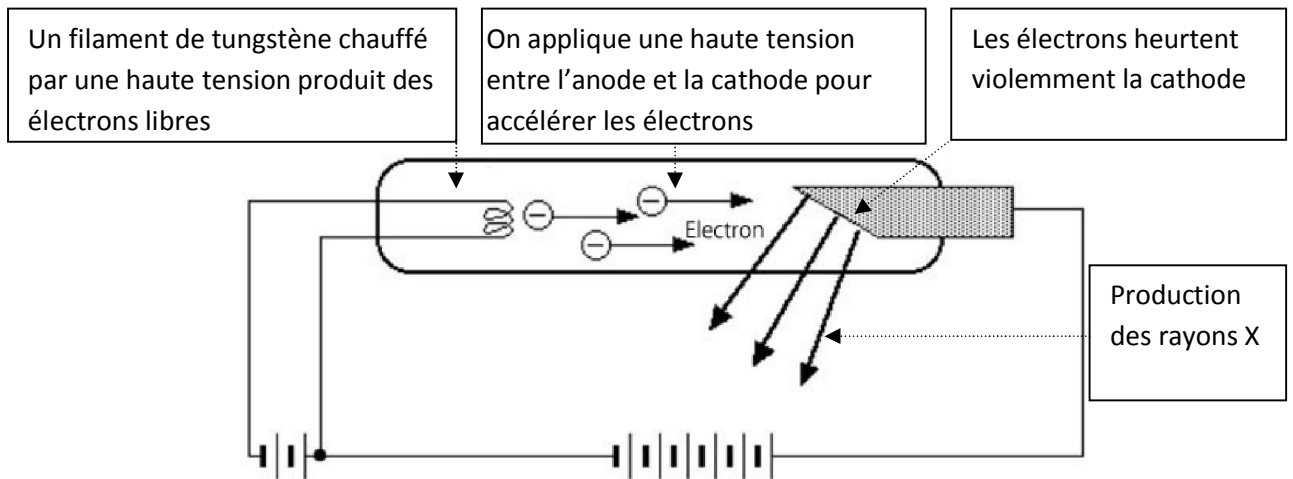
- Un rayonnement électromagnétique est constitué par la superposition de rayonnements de fréquences différentes, On parle alors du spectre électromagnétique.
- En physique, les rayonnements électromagnétiques se présentent sous deux aspects complémentaires : ondulatoire et corpusculaire.

On note que les ondes électromagnétiques peuvent se propager dans le vide. Contrairement aux ondes sonores, qui ont besoin d'un milieu matériel pour se propager.



1.1.2. Bases physique des rayons X :

La production des rayons X fait suite à une interaction violente entre un électron à une vitesse très élevée, et une cible métallique très dense.



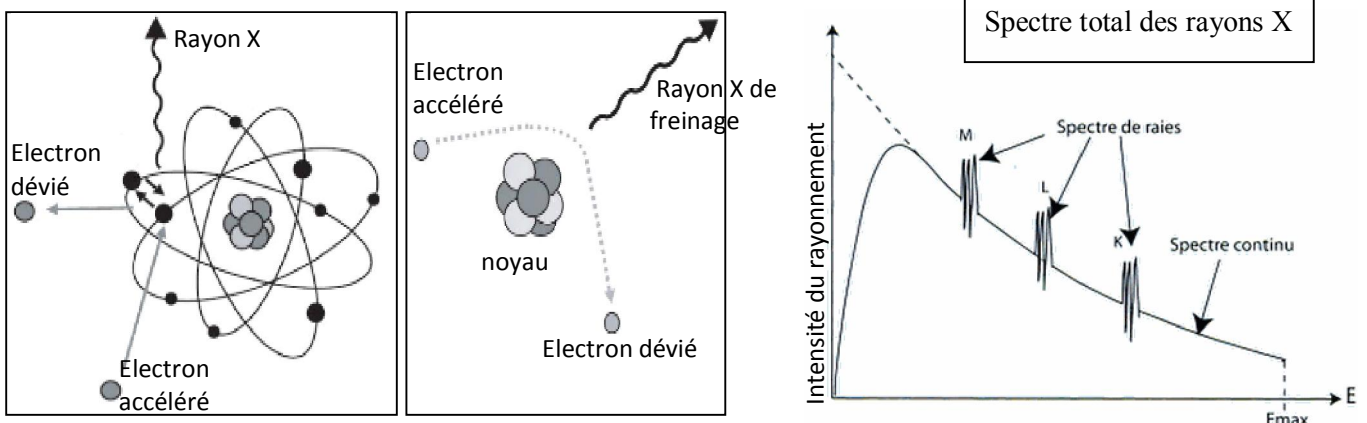
Les électrons sont accélérés par une forte différence de potentiel, de plusieurs milliers de volts. Lorsque les électrons accélérés percutent la cible, il y a perte d'énergie et émission de rayonnements X par deux types d'interactions :

➤ **Interactions avec les électrons :**

Un électron incident peut expulser un électron d'un atome de la cible. L'électron expulsé laisse sa place à un autre d'une couche supérieure et perd une partie de son énergie qui est émise sous forme d'un photon X. Ce phénomène donne 1% du rayonnement total (spectre discret de raies).

➤ **Interactions avec les noyaux :**

Quand un électron passe à proximité du noyau, il est attiré par la charge positive nucléaire, et sa trajectoire est modifiée. Il émet de l'énergie sous forme d'un photon X. Ce rayonnement émis est appelé rayonnement de freinage. On obtient par ce phénomène 99% du rayonnement total, et se représente par un spectre continu.



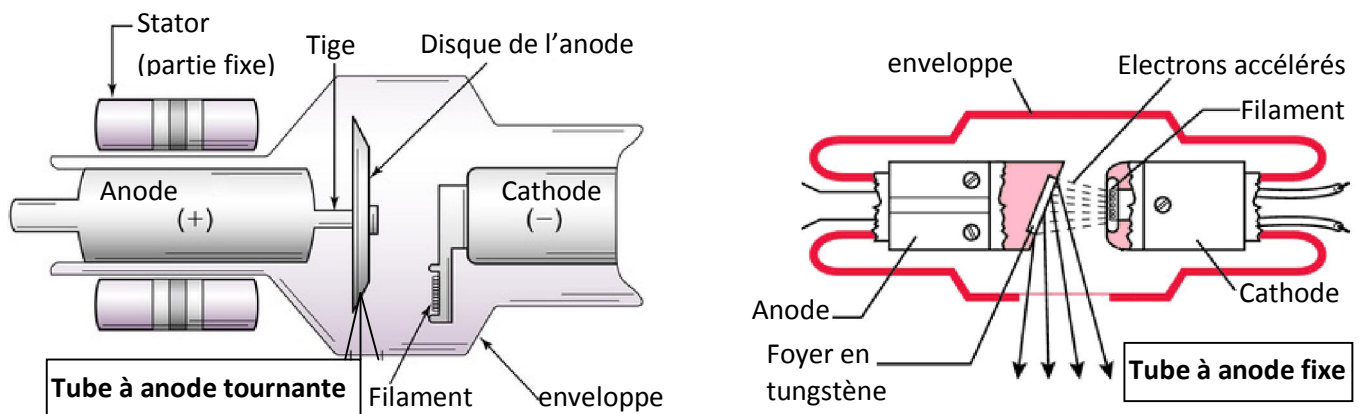
Le spectre total de rayons X est constitué d'un spectre continu et d'un spectre discret de raies.

1.1.3. Tube à rayons X :

La production des rayons X se fait par le tube à rayons X. il se compose de :

- L'enveloppe externe : une ampoule en verre ou plus récemment une association métal-céramique, dans lequel règne le vide.
- La cathode : est constituée par un filament de tungstène (Le tungstène est l'élément chimique ayant le plus haut point de fusion 3.400 °C) qui est chauffé par un courant à 2500 degrés, l'échauffement du filament fait naître un nuage d'électrons.
- L'anode : cible en tungstène attirant ces électrons grâce à une différence de potentiel entre la cathode et l'anode, va produire 99 % de chaleur et seulement 1 % de rayons X.
- Un système de refroidissement (ventilation, huile..) est nécessaire vu la chaleur importante,

Ils existent plusieurs types de tubes à rayons X : Tube de Crookes, Tube de Coolidge, Tube à anode fixe, Tube à anode tournante (en tournant, chaque partie de l'anode n'est irradiée que durant un court instant, ce qui facilite la dissipation de la chaleur), Le tube Straton (Siemens)...

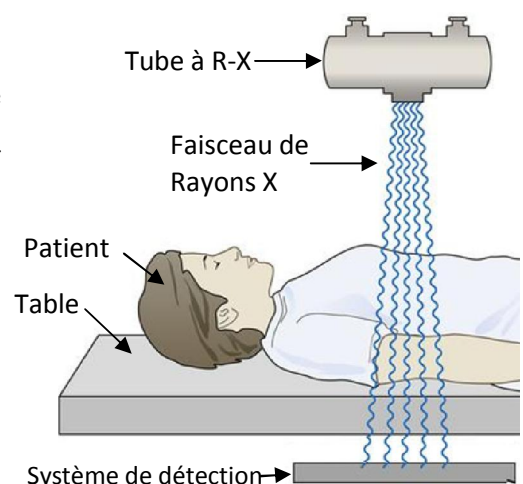


1.2. Radiologie conventionnelle :

La radiographie conventionnelle est une technique d'imagerie qui utilise les rayons X, permettant d'obtenir des clichés (images) de certaines parties du corps.

1.2.1. Matériel et méthode :

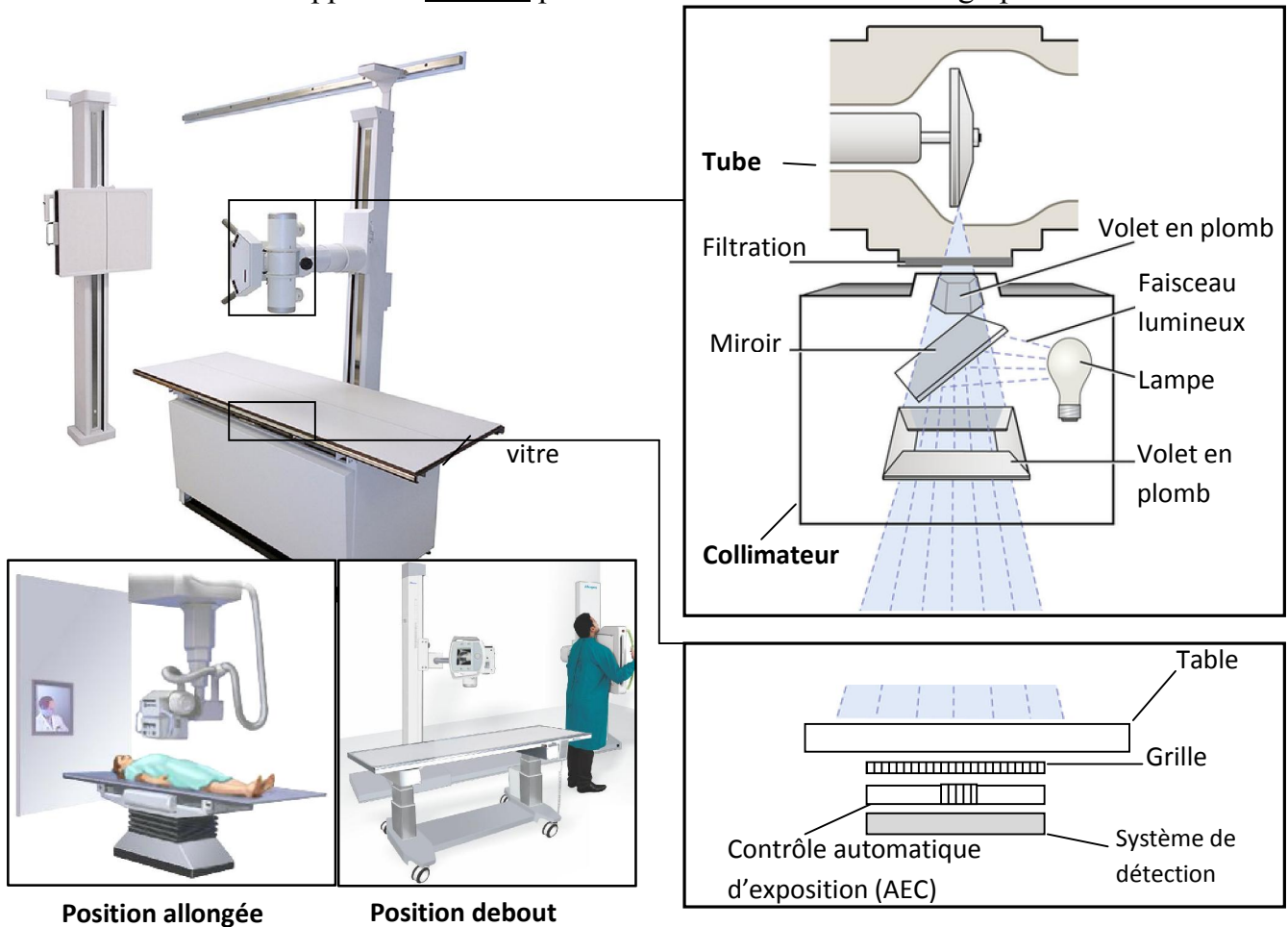
Le principe est simple : le patient est placé entre la source (tube à rayons X) et le système de détection. En général, seuls deux appareils sont nécessaires à la pratique de la



radiographie : un appareil produisant des rayons X et un système de détection des rayons.

Dans les services de radiologie, les appareils de radiologie sont installés dans les pièces à murs épais qui évitent le passage des radiations.

- Le radiologue est placé derrière une vitre qui ne laisse pas passer les R-x, et il suit l'examen.
- Les clichés peuvent être réalisés dans différentes positions (debout, allongée) selon la nécessité de l'examen et l'état du malade.
- Il existe aussi des appareils mobiles permettant de réaliser des radiographies au lit.



Les principaux composants d'un système de radiologie conventionnelle sont :

- **Un tube des rayons X** : à anode tournante.
- **Un collimateur** : permet de délimiter la zone irradiée qui doit être limitée. Il comprend aussi une lampe dont le faisceau lumineux qui imite (simule) le faisceau X permet de contrôler la taille, la localisation, et la forme du faisceau X. Il est doté parfois de filtration qui permet d'éliminer les photons de basse énergie.
- **Générateur haute tension** : fournit la haute tension nécessaire pendant une radiographie qui dure 0.1 seconde environ.

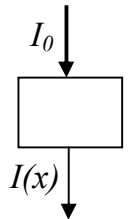
- **Système de détection** : permet la détection et la visualisation de l'image radiante.
- **La grille** : est constituée de fines lamelles de plomb et de papier son rôle est d'augmenter le contraste de l'image en atténuant le rayonnement diffusé par le patient (par effet de Compton).
- **Système de contrôle** : se compose de différents circuits et un panneau de contrôle.
- **Une table** (télécommandée) - **Un statif vertical** pour faire des clichés patient debout.

1.2.2. Formation de l'image radiante :

Le rayonnement x émis traverse le corps et ses différents tissus. Lors de cette traversée, certains tissus absorbent les rayons (os) et d'autre les laissent passer (muscles) à différents degrés. Les rayons ainsi subissent un phénomène d'atténuation. Elle est exprimée par la relation :

$$I(x) = I_0 e^{-\mu \cdot x} \quad \text{où :}$$

$I(x)$: l'intensité du faisceau après avoir traversé une épaisseur x de matière ; I_0 : l'intensité du faisceau incident ; μ : la densité de la matière ;



Finalement, les rayons sortants des différentes structures traversées sont projetés sur un même plan pour former l'image radiologique latente (radiante). Il existe en quelque sorte une addition (superposition) de l'ensemble des structures traversées par les rayons X.

L'atténuation des photons provient de deux types d'interactions avec la matière traversée :

- **Avec des électrons périphériques** : l'effet Compton : qui brouille l'image radiographique. (on utilise des grilles anti-diffusantes qui améliorent le contraste de l'image).
- **Avec des électrons profonds** : l'effet photoélectrique : entraîne l'émission d'un photon de fluorescence. C'est le phénomène physique qui donne l'image radiologique.

1.2.3. Détection de l'image par le film argentique :

Le rôle du système de détection est la conversion de l'image radiante invisible en une image visible. Pour ce faire, plusieurs techniques anciennes et nouvelles sont disponibles.

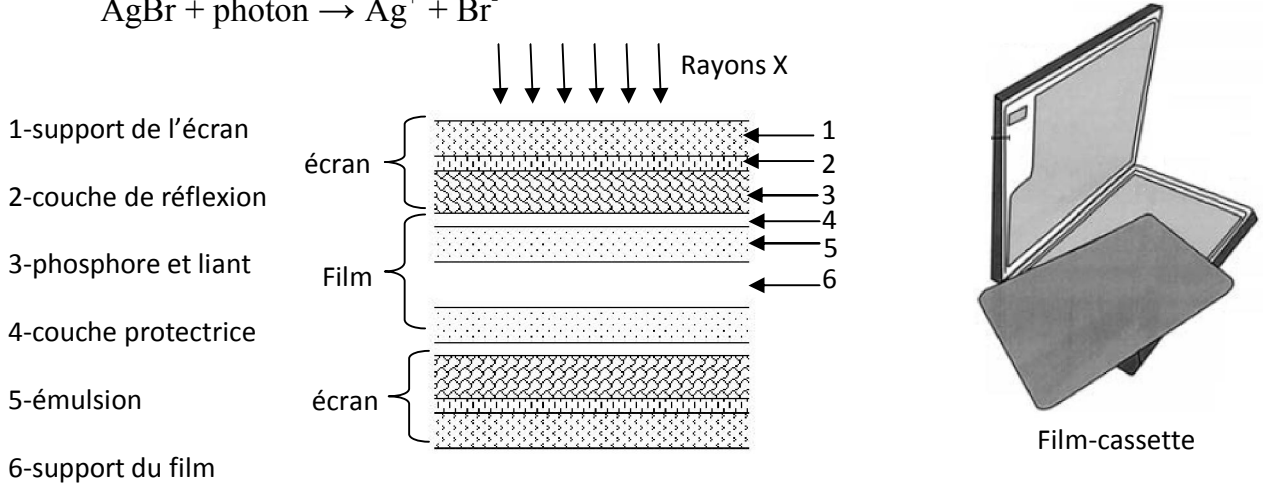
Le film est la méthode traditionnelle utilisée en radiographie. Il est constitué d'un support transparent en polyester recouvert d'une émulsion contenant des cristaux de bromure d'argent AgBr. Des écrans renforceurs placés de part et d'autre du film accroissent son efficacité.

Le couple film-écran est contenu dans une cassette. La cassette protège le film de la lumière du jour mais permet le passage des rayons X jusqu'au film.

- Les rayons X, en traversant la couche 3, où se trouve le phosphore et le liant, vont être

absorbés par les cristaux fluorescents de cette couche.

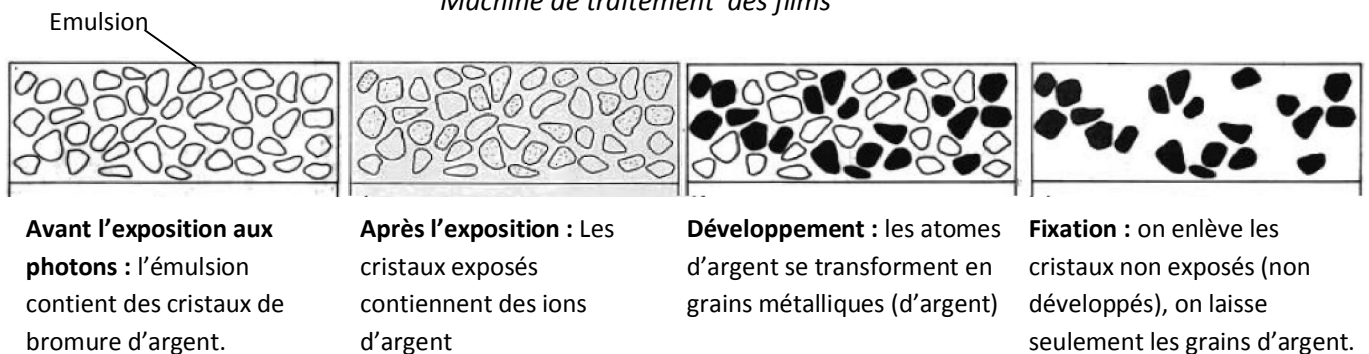
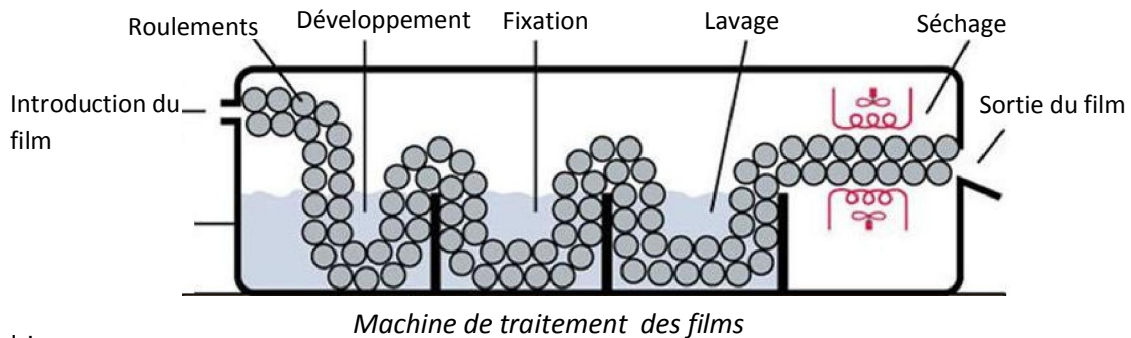
- Ces cristaux vont émettre de la lumière.
- Le film radiologique est exposé à la lumière émise. Les cristaux de l'émulsion sont sensibles aux photons, et se dissocient en ions par effet photolytique créant ainsi une image latente :



- Pour passer du film radiologique au cliché (image visible), il faut traiter ce film.

Le traitement se fait avec une machine automatique en passant par les étapes suivantes :

Développement → Fixation → Lavage → Séchage.



1.2.4. Détection dans la radiologie numérique :

Dans la radiologie numérique, le film-écran est remplacé par un système de détection permettant l'obtention des images numériques. Plusieurs techniques sont utilisées :

a. La radiographie computerisée (computed radiography):

Dans cette technique, on utilise comme système de détection l'écran radioluminescent à mémoire (ERLM). L'ERLM est constitué d'une couche de Chlorure ou Iodure de Baryum Fluoré dopé à l'Europium (BaFX:Eu où X = Bromure, Chlore ou Iode).

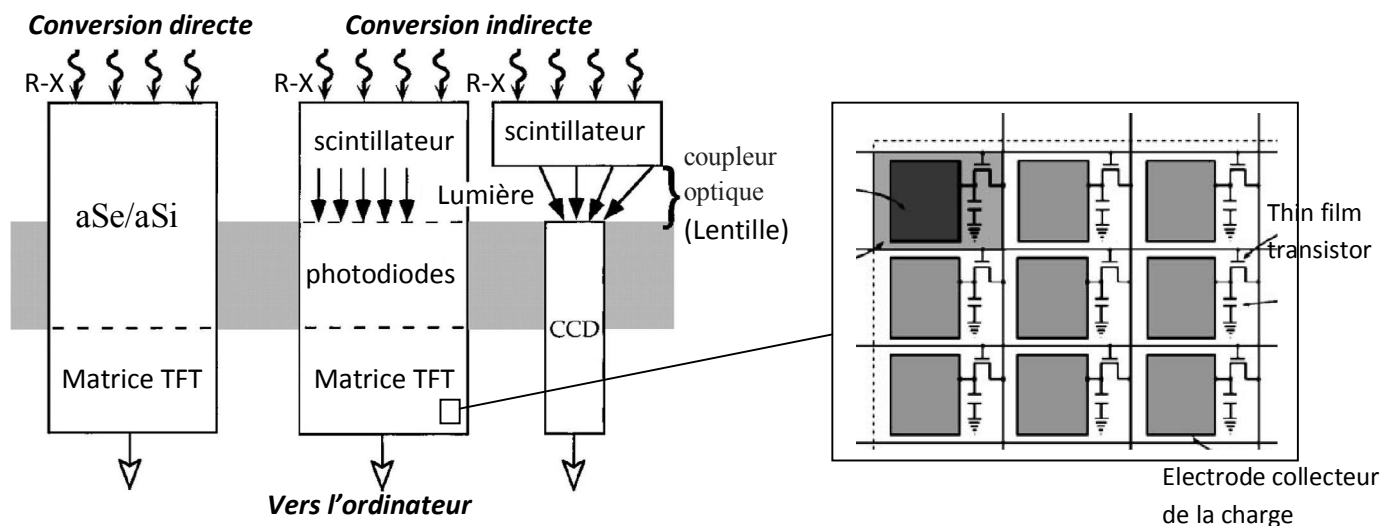
- Après l'exposition aux rayons X, les ions d'europium libèrent un électron ($\text{Eu}^{2+} \Rightarrow \text{Eu}^{3+}$). Ces électrons vont être piégés dans des sites métastables. (c'est l'énergie stockée dans ces sites).
- L'écran est inséré dans un lecteur qui balaye le scintillateur à l'aide d'un faisceau Laser. Le Laser libère l'énergie stockée sous forme de lumière. Cette émission lumineuse est transmise à un tube photomultiplicateur qui produit un signal électrique qui est amplifié, converti en signal numérique et enregistré sur un ordinateur.
- La cassette ERLM est réutilisable après réinitialisation (exposition à une lumière intense).

b. La radiographie numérique à conversion indirecte :

Les R-X sont transformé par un écran photoluminescent ou scintillateur (Iodure de Césium : CsI ou Oxyde de Gadolinium : GadOx) en lumière. Cette lumière est transformée en signal électrique par des caméras à CCD (Charge Coupled Device), ou des matrices de transistors (thin-film transistors : TFT), réalisés dans une couche de silicium amorphe.

c. La radiographie numérique à conversion directe :

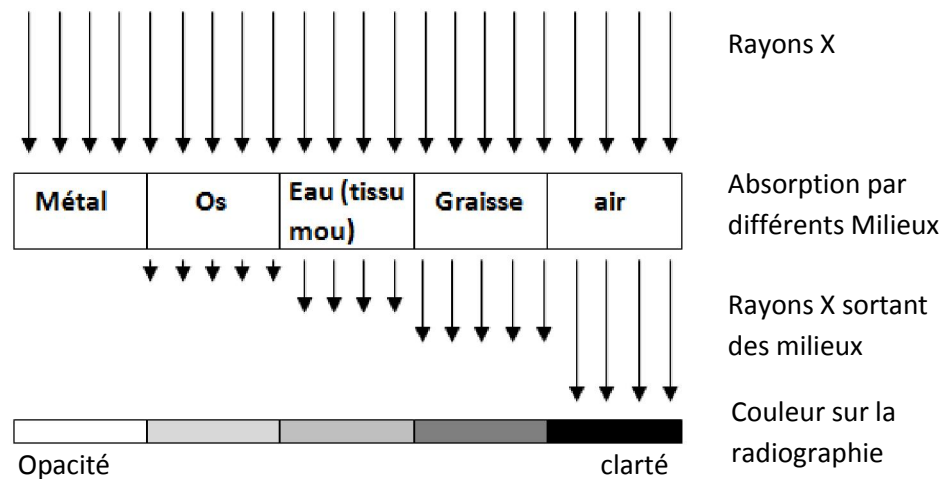
Ne nécessite pas de conversion du faisceau X en lumière. Un détecteur à capteur plan est utilisé. Il est composé d'un ensemble de Sélénium amorphe et de silicium amorphe (aSe/aSi). La couche de Sélénium est soumise à une haute tension qui la polarise, lorsqu'elle est exposée au rayonnement X, il se produit des paires d'électrons-trous qui sont collectés sur une électrode. Ces charges capturées sont converties en signal électrique par un réseau de transistors TFT.



1.2.5. Interprétation de l'image radiologique :

L'image radiographique finale est formée de différentes zones de couleurs allant du noir au blanc selon la densité des structures anatomiques traversées. Les quatre densités fondamentales sont :

- La densité calcique qui caractérise l'appareil squelettique, les os donc sont les plus denses en radiographie classique. Elles apparaissent en blanc sur le cliché.
- La densité hydrique qui caractérise les différents organes pleins : le foie, la rate, les reins, etc.
- La densité graisseuse correspond à la graisse qui entoure de nombreux organes. Elle est légèrement inférieure à la densité hydrique et apparaît en gris ;
- La densité aérique représente l'ensemble des structures qui comportent de l'air : les poumons, les sinus de la face et certaines portions du tube digestif. Elles apparaissent en noir.



1.2.6. Quantification du rayonnement :

Les mesures utilisées habituellement pour quantifier la dose de rayonnement en radiologie sont :

Dose absorbée : c'est la quantité de rayonnement absorbé par un corps exposé à des rayons, elle est mesurée en gray (Gy, où $1 \text{ Gy} = 1 \text{ joule/kg}$), 1 Gy correspond à la quantité d'énergie absorbée par unité de masse. (un radio-thorax demande une dose d'environ $0,3 \text{ mGy}$)

Dose équivalente : est utilisée pour exprimer les effets biologiques du rayonnement ionisant sur la matière vivante. Ces effets dépendent de l'énergie du rayonnement, et de la nature de ce rayonnement. Par exemple, la même dose des rayons alpha a un impact double que celui des rayons gamma (pris comme référence). L'unité de mesure est le Sievert (Sv). La limite autorisée pour l'exposition d'une personne aux rayonnements est : $1 \text{ mSv/an/personne}$.

1.3. Modalités de la radiologie conventionnelle :

La radiologie conventionnelle comprend deux grandes familles de techniques : la radiologie standard et la radiologie avec des produits de contraste.

1.3.1. La radiologie standard :

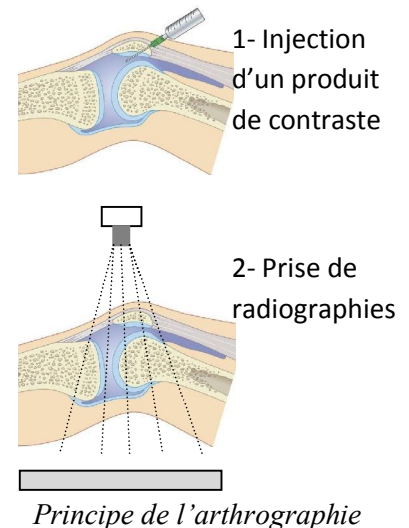
Différentes parties du corps humain peuvent être examinées par la radiologie standard, les plus importantes radiographie standards sont :

- **La radiographie thoracique** : de face (sujet debout, incidence postéro-antérieure des rayons, inspiration profonde). Ou de profil (incidence latérale).
- **Abdomen sans préparation ASP** : il s'agit d'un cliché simple de l'abdomen.
- **La radiographie osseuse** : concerne surtout le crâne et le massif facial, le rachis, les épaules, le squelette des membres supérieurs et inférieurs, le bassin. Elle permet de rechercher des fractures, des signes d'arthrite ou d'arthrose, des malformations...
- **Le panoramique dentaire**, c'est la radiographie des dents et des mâchoires.

1.3.2. La radiologie avec produit de contraste :

Un produit de contraste est une substance radio-opaque introduite dans l'organisme (par voie orale, par injection ou par insufflation par canule), avant la prise des clichés. Les produits utilisés sont à base d'iode, ou des solutions barytées (sulfate de baryum),... Parmi ces examens :

- **Arthrographie** (de l'épaule, de la cheville, de la hanche, du coude, du genou, du poignet,...). Consiste à injecter un produit de contraste à l'intérieur de l'articulation à la recherche de lésions des structures intra-articulaires.
- **Transit baryté** : c'est un examen radiologique permettant d'étudier le tube digestif haut. Il consiste à faire ingérer par le patient de la baryte. Puis des clichés radiographiques sont pris à différents temps.
- **Urographie intraveineuse (UIV)** : Se fait par l'injection d'un produit de contraste iodé dans une veine pour visualiser les voies urinaires. L'élimination du contraste par les reins va permettre d'opacifier et visualiser la totalité des voies urinaires excrétrices et la vessie.

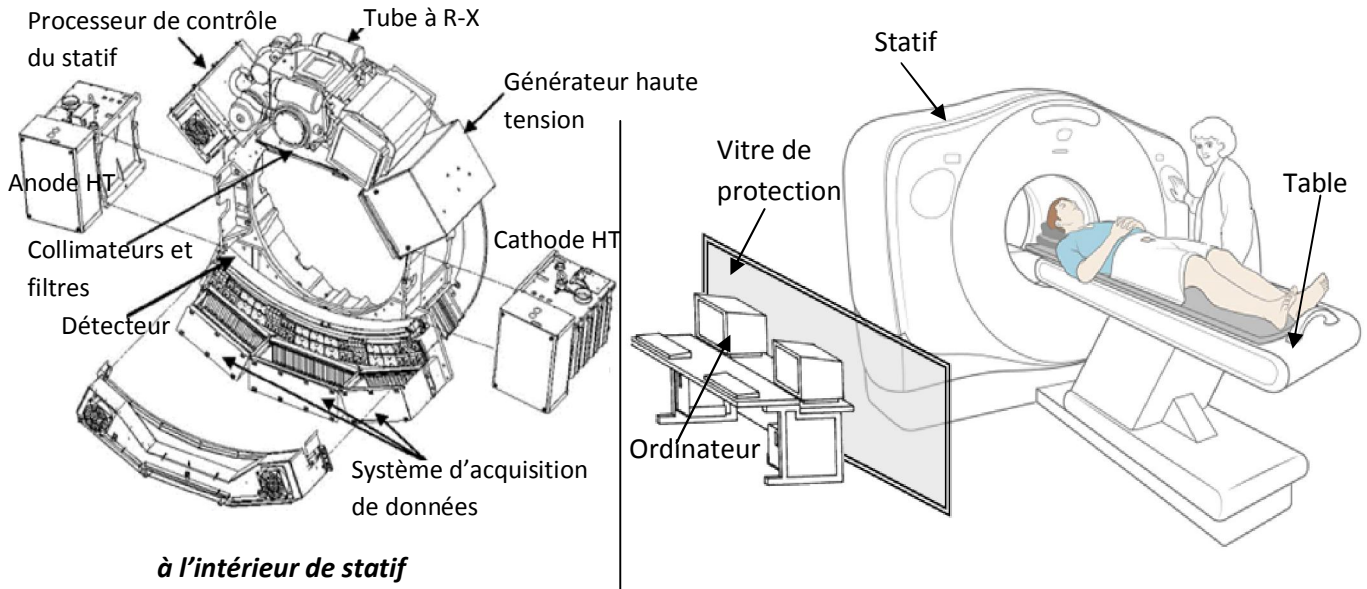


1.4. La tomодensitométrie TDM (Scanner) :

La tomодensitométrie (TDM) ou Scanographie (Scanner) est une méthode d'imagerie utilisant des rayons X et permet d'obtenir des images de coupes transversales du corps.

1.4.1. Matériel :

Le scanner se compose de : un statif, une table, un ordinateur, des armoires annexes contiennent une partie de la climatisation et de la distribution électrique.



a. Le statif : est composé de :

Générateur : il fournit la haute tension au tube (80 à 140 kV).

Tube à rayons X : Ils sont à anode tournante, avec émission continue. L'ensemble tube-détecteurs vont tourner autour du patient.

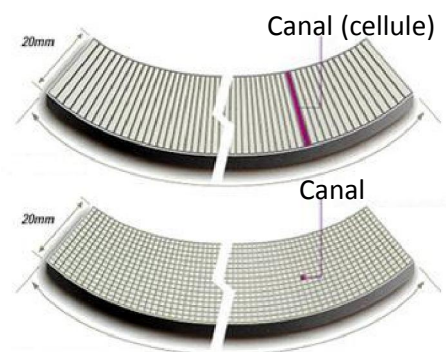
Filtration : Les rayons X émis ont des niveaux énergétiques variés ; la filtration placés à la sortie du tube permet d'obtenir un spectre de rayonnement étroit en supprimant les rayons non désirés.

Collimation : la collimation primaire (entre le tube et le patient) détermine la largeur du faisceau de rayons X et donc l'épaisseur de coupes (1 à 10 mm). La collimation secondaire (entre le patient et les détecteurs) a pour but de diminuer le rayonnement diffusé.

Détecteurs : transforment les photons X en signal électrique.

Une barrette de détection est constituée de multiples cellules de détection (près de 900 détecteurs) placés côte à côte en face du tube à rayons X sur un arc de cercle.

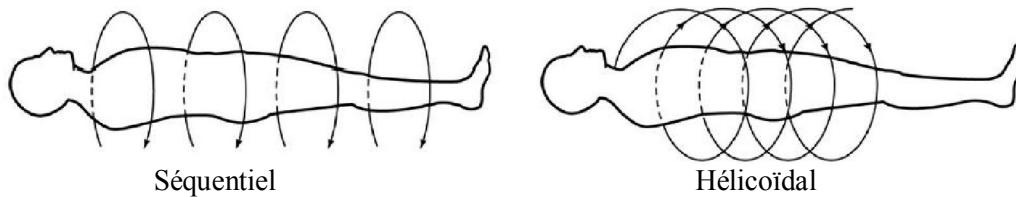
Les scanners multibarrettes actuels utilisent simultanément 4, 8 ou 16 rangées de détecteurs.



Détection monocoupe et multicoupe

b. La table d'examen :

La table d'examen sur laquelle s'allonge le patient et s'avance à l'intérieur de l'anneau du statif ; elle permet une avance pas à pas (mode séquentiel) ou continue (mode hélicoïdale).



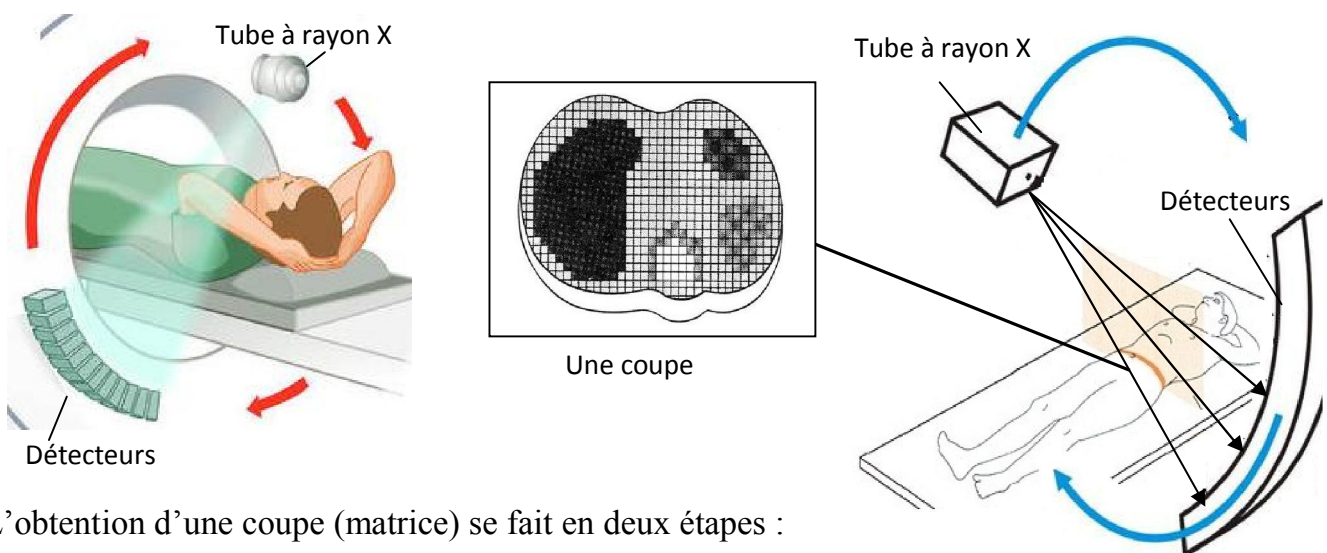
c. Ordinateur

Il assure : l'acquisition des données (des projections), la reconstruction des images et le contrôle du système.

1.4.2. Principe d'imagerie par TDM :

Dans la salle d'examen, le patient est allongé sur un lit qui va lentement se déplacer dans le statif (cercle du scanner). Il doit rester immobile. L'examen dure en moyenne une quinzaine de minutes. Parfois, l'examen nécessite l'injection préalable d'un produit de contraste.

La TDM permet l'obtention d'une série de coupes transversales d'une partie du corps. Une coupe est une image bidimensionnelle représentée comme une matrice composée de n lignes et n colonnes définissant un nombre de carrés élémentaires (pixels). La taille des matrices actuelles sont le plus souvent 512×512 , pouvant aller sur certaines machines jusqu'à 1024×1024 . À chaque pixel de la matrice correspond une valeur d'atténuation ou de densité qui prend une couleur dans l'échelle de gris (allant du blanc au noir).



L'obtention d'une coupe (matrice) se fait en deux étapes :

- **Etape 1 : réalisation de plusieurs projections :**

Contrairement à une radiographie classique, dans le TDM la source de rayons-X n'est pas fixe.

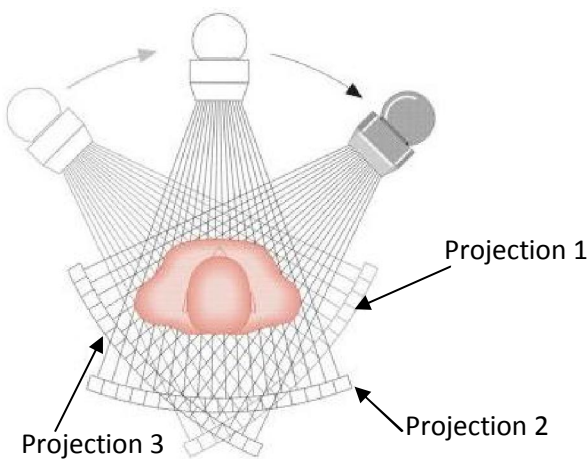
Elle tourne autour de l'organe à explorer. Suite à cette rotation, on va obtenir plusieurs projections suivant des degrés différents. Une projection représente une superposition des densités de tous les tissus traversés par les rayons.

• **Etape 2 : Reconstruction de l'image de la coupe :**

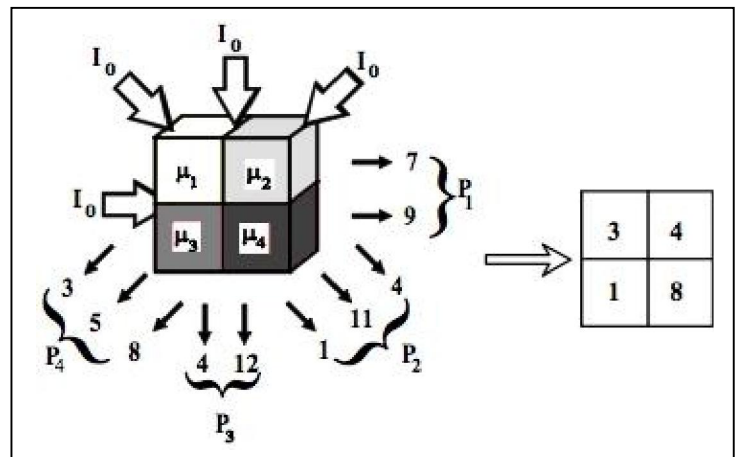
A partir de n projections obtenues, l'ordinateur calcule la densité de chaque pixel de la matrice (coupe). Ces calculs complexes reposent sur un principe simple : connaissant la somme des chiffres d'une matrice selon tous ses axes (rangées, colonnes et diagonales), on peut en déduire les chiffres contenus dans la matrice.

Les méthodes utilisées pour la reconstitution de l'image se répartissent en deux grandes familles :

- Les méthodes algébriques : par résolution d'un système d'équations.
- Les méthodes analytiques : la méthode la plus utilisée est la rétroprojections.

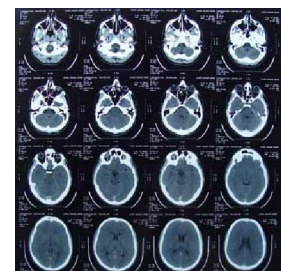
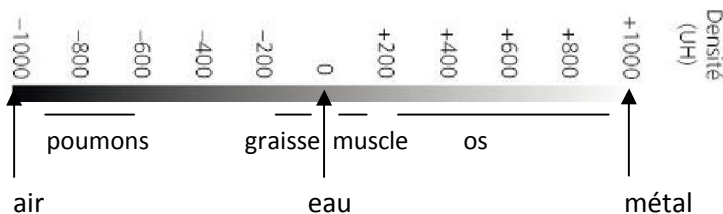


Avec la rotation autour du corps, on obtient plusieurs projections



Exemple simple de calcul des valeurs des pixels à partir de leurs sommes en 4 projections

Les coefficients de densité des différents tissus sont exprimés en unités Hounsfield (UH). Avec -1000 (métal) , +1000 (air), 0000 (eau).

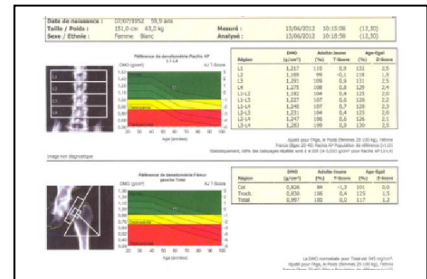


TDM de la tête (16 coupes)

1.5. Autres examens utilisant les rayons X :

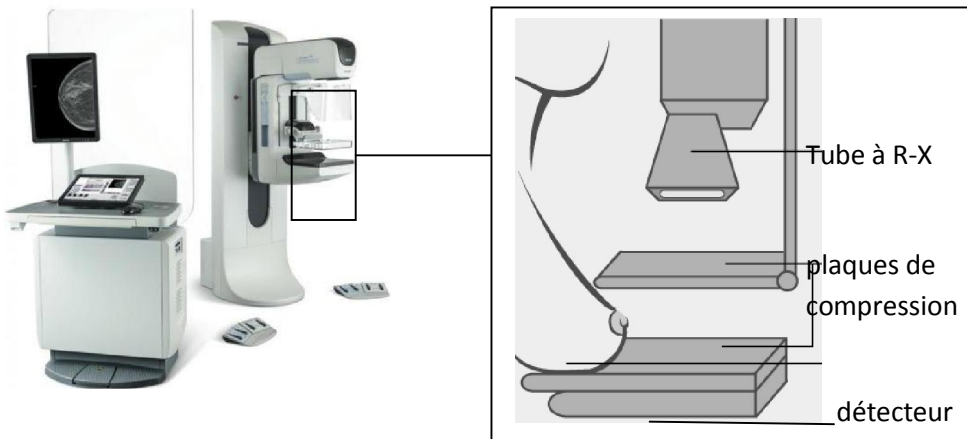
1.5.1. Densitométrie osseuse :

La densitométrie osseuse étudie la masse de calcium contenue dans l'os. Son principe consiste à mesurer la densité osseuse au niveau de la hanche, de la colonne vertébrale et du fémur. Pour ceci on mesure l'atténuation subie par le faisceau de rayons x après sa traversée des tissus osseux. On établit ainsi un score (t-score et z-score).



1.5.2. Mammographie :

La mammographie étudie la glande mammaire et permet de dépister des anomalies des tissus, notamment une tumeur du sein même à un stade précoce.



1.5.3. Radiographie dentaire :

Nécessite un équipement spécial pour réaliser différentes radiographies dentaires.

