Bases physiques de l'imagerie médicale et de la radiothérapie

L'imagerie médicale

- **L'imagerie utilisant des rayonnements ionisants (RI)**
  - **RX en radiologie: imagerie par atténuation: radiographie conventionnelle, amplificateur de luminance, scanner (TDM ou CT)**
  - **Rγ (gamma) en médecine nucléaire: imagerie par émission: scintigraphie**
- **Imagerie n'utilisant pas de RI:**
  - **US (Ultrasons) en échographie et écho-doppler: on quantifie «la quantité d'US » réfléchie par les différents organes .**
  - **Radiofréquences en Résonance Magnétique Nucléaire: RMN: un champ magnétique fait vibrer les protons de l'hydrogène; des signaux sont émis et mesurés : c'est l'Imagerie par Résonance Magnétique IRM**

Utilisation des RI en Thérapeutique

- **Radiologie interventionnelle:**
- **traiter des malformations vasculaires (anévrysme), pose de stent en cardiologie, traitement de tumeurs digestives…**
- **Médecine nucléaire :**
- **radiothérapie métabolique : administration orale de l'iode 131 pour traiter des maladies de la thyroïde**
- **Radiothérapie :**
- **externe: source d'irradiation est située à l'extérieur du malade ,**
- **Interne: sources radioactives placées à l'intérieur de l'organisme**

Imagerie radiologique

Principe de formation de l'image radiologique

L'équipement en Radiologie

L'imagerie médicale

- **L'imagerie utilisant des rayonnements ionisants (RI)**
  - **RX en radiologie: imagerie par atténuation: radiographie conventionnelle, amplificateur de luminance, scanner (TDM ou CT),**
  - **Rγ (gamma) en médecine nucléaire: imagerie par émission: scintigraphie**
- **Imagerie n'utilisant pas de RI:**
  - **US en échographie et écho-doppler**
  - **IRM : champ magnétique qui fait vibrer les protons de l'hydrogène**

Objectifs du cours en imagerie radiologique

- **Schématiser et Décrire le principe de fonctionnement du Tube à RX**
- **Expliquer l'atténuation des RX par les structures de l'organisme**
- **Décrire les mécanismes de Formation de l'image radiologique**
- **Savoir distinguer radiologie classique et radiologie numérique**
- **Savoir identifier les appareils de radiologie standard et de TDM en expliquant brièvement le principe de leur fonctionnement.**

Plan

- Généralités
- Principe de formation de l'image radiologique
  - RX: origine, absorption, spectre
  - Tube à RX: description et principe de fonctionnement
  - Atténuation des RX par les structures de l'organisme
  - Formation de l'image radiologique
    - Radiologie classique ou standard: Ecran/Film
    - Radiologie numérique
- L'équipement en Radiologie et illustrations
  - Constitution d'un équipement en radiologie
  - Le Radiodiagnostic
  - Le CT
  - Le CT hélicoidal
  - Le CT multicoupes

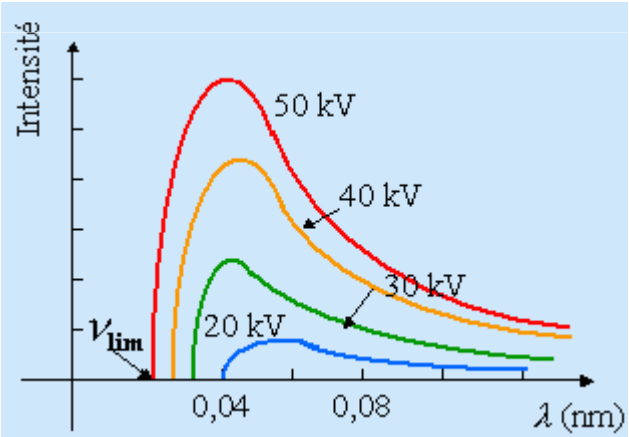
Quelques dates importantes

- **1895: découverte des RX par M.C. Roentgen qui réalisa alors une radiographie la main de son épouse. L'exploration par les RX s'est répandue rapidement en France, Allemagne, Autriche, Hongrie, USA**
- **Juillet 1896 : Utilisation des RX en thérapeutique du cancer à Lyon.**
- **1972: Sir G.N Hounsfield introduit le traitement informatique de l'image en radiologie : 1ère génération CT ou scanner réalisant des coupes dans un seul plan axial. Années 80 : CT hélicoïdal tournant en hélice autour du malade.**
- **CT multi-détecteurs (multi-barettes): coupes dans différents plans : axial, sagittal, oblique; l'image est volumique en 3D, permettant l'angio-CT: coroscan et colonoscan sans geste invasif.**

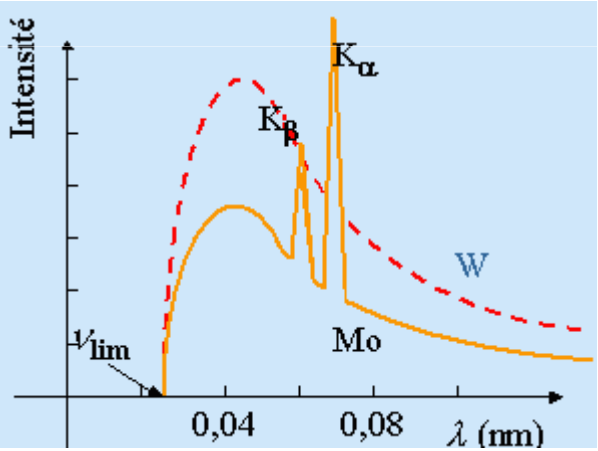
Des rappels sur les Rayons X (RX)

- **Rappel: Les rayons X (RX) : photons émis si un faisceau d'électrons accélérés percute une cible matérielle: noyau ou électron (é). Deux types d'interactions**

- **é-noyaux -> rayonnement de freinage (spectre énergétique continu) : tube à RX**
- **é-électrons -> Ryt caractéristique (spectre de raies caractéristique de la cible)**

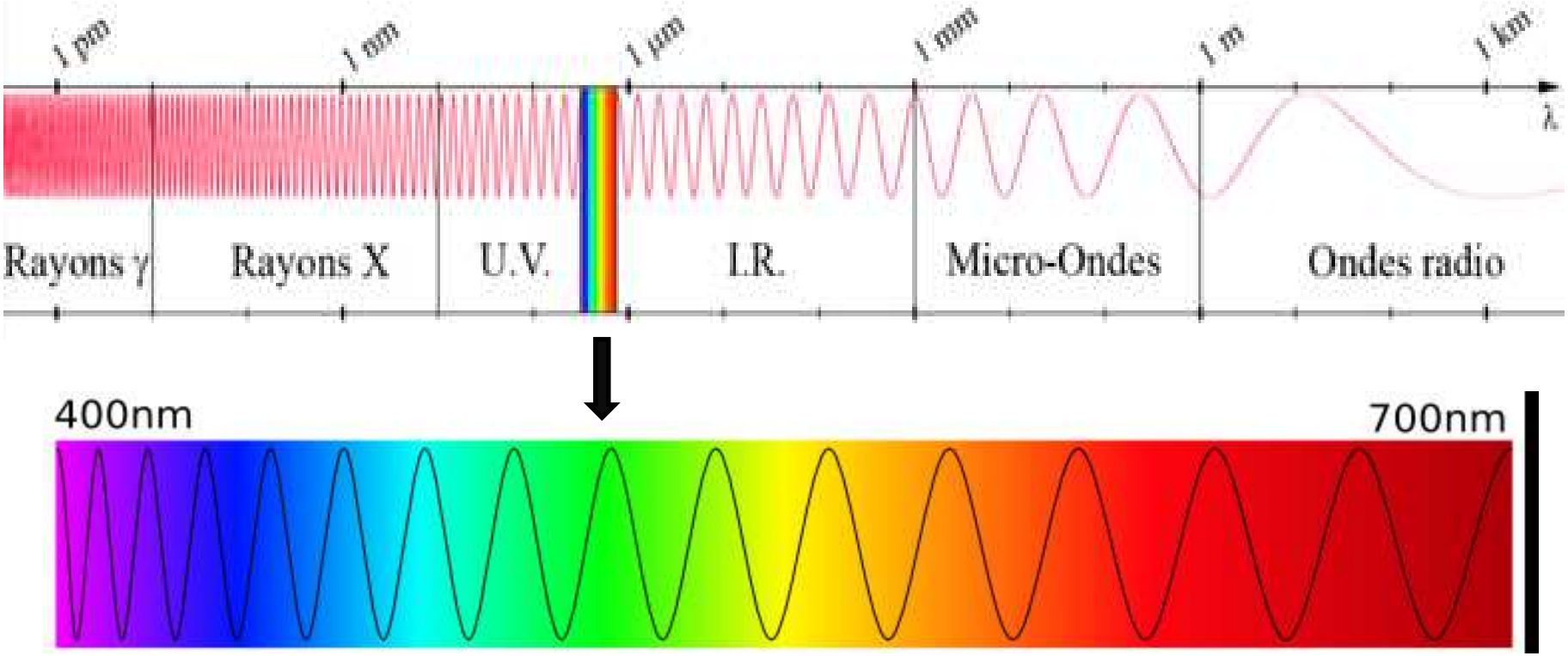


Spectre continu du tungstène.



- Spectre continu de RX du tungstène (W)
- Spectre caractéristique du molybdène (Mo) obtenus avec la même tension accélératrice des électrons.

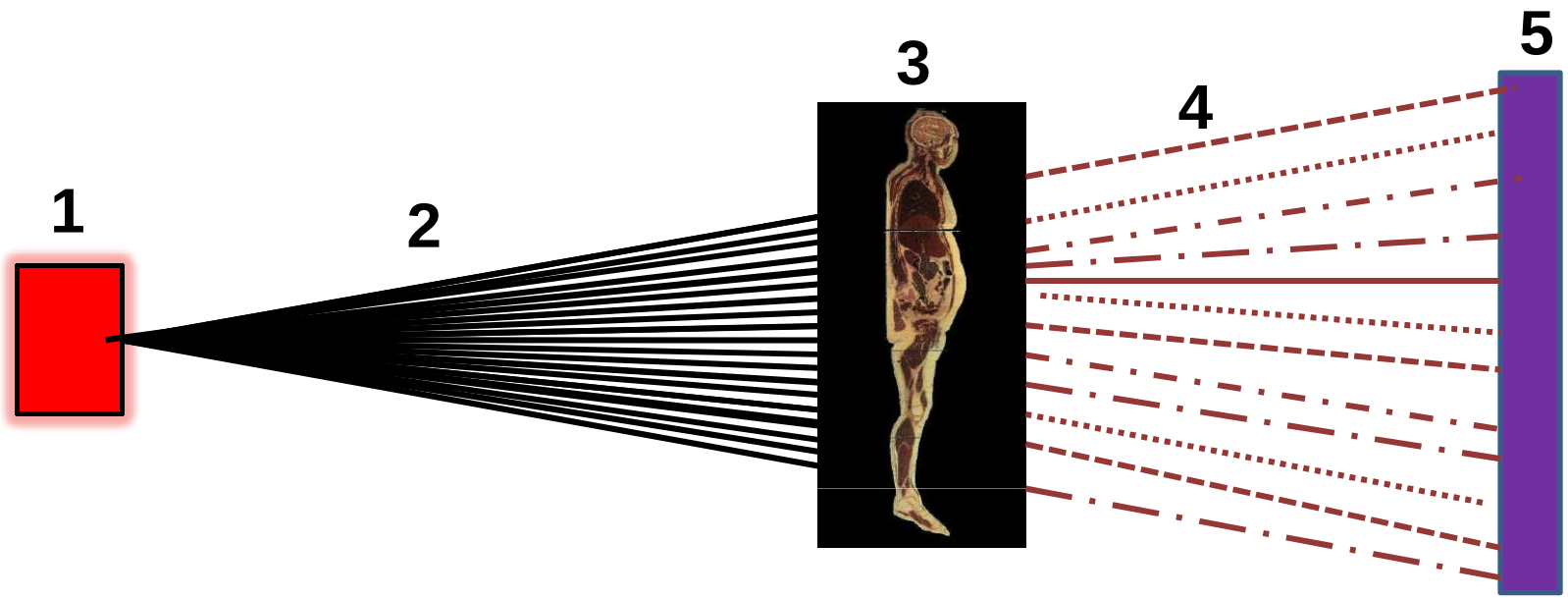
Spectre électromagnétique



Spectre Visible

Source Wikibooks

Formation de l'image radiologique+++



- 1- Tube de Coolidge produit un faisceau de RX
- 2- Faisceau incident et homogène de RX
- 3- Patient atténuant le faisceau de RX
- 4- Faisceau sortant (transmis) de RX hétérogène: image radiante
- 5- Appareil de détection reçoit le faisceau transmis

Production des RX en Radiodiagnostic+++

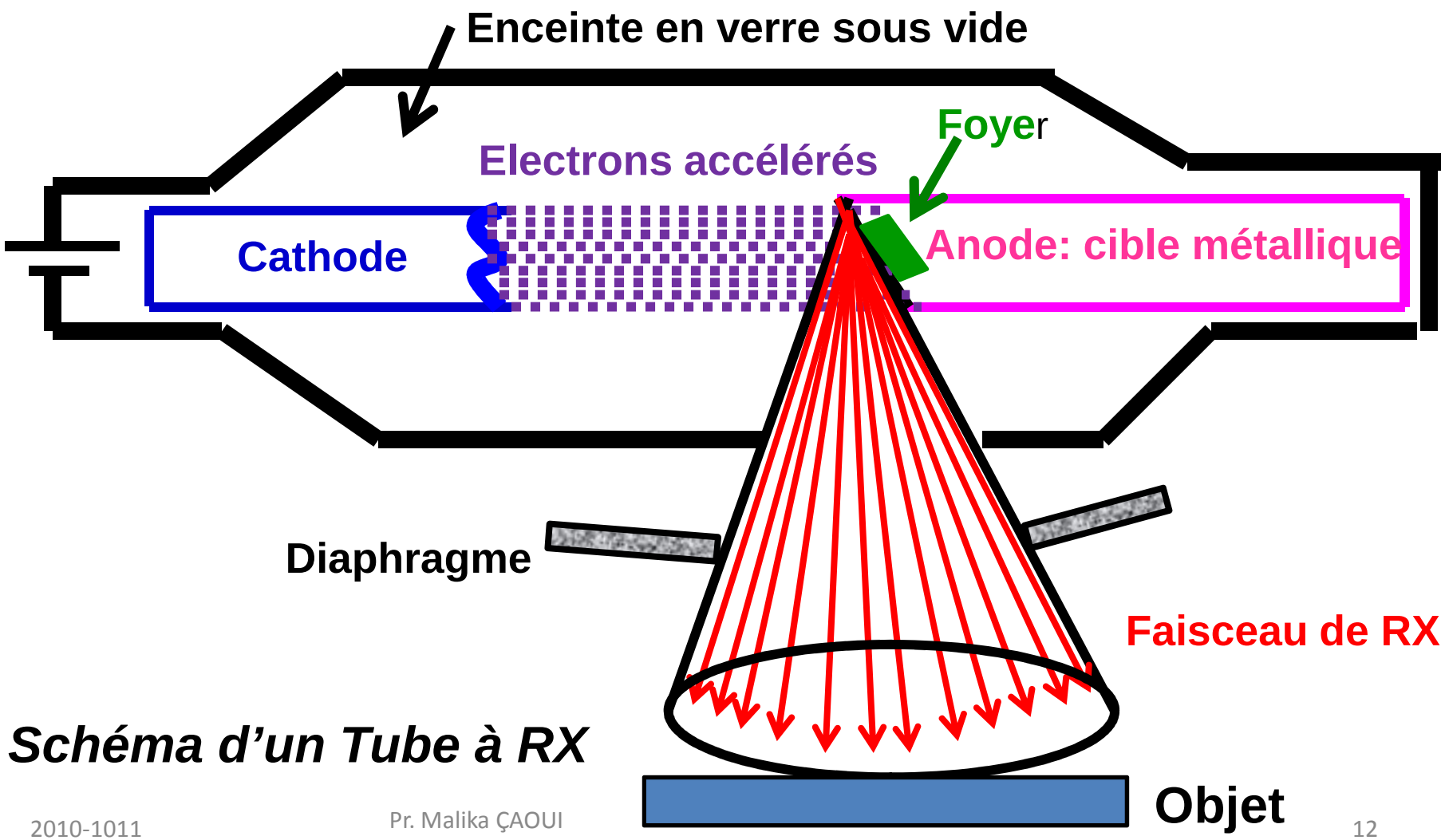


Schéma d'un Tube à RX

1-Principe de fonctionnement du Tube à RX+++

- **Tube à RX: constitués de trois éléments placés sous vide**
- ***Source d'électrons* (cathode): filament de tungstène subit un échauffement et émet un flux d'électrons d'où un courant mesuré en mA (milliampères).**
- **Accélérateur d'électrons par une tension appliquée entre la cathode et l'anode, mesurée en KV (kilovolts) . La tension variant de 40 – 90 KV jusqu'à 100-130 KV (RX plus pénétrants).**
- **Cible métallique (anode): alliage en tungstène et rhénium assurant le freinage des électrons accélérés et émet, par le foyer, des RX.**

2-Faisceau incident et homogène de RX+

- **Le faisceau de RX qui sort du tube est homogène, divergent, conique et se propageant en ligne droite**
- **Il est collimaté par un diaphragme dont le rôle:**
  - **Il réduit l'irradiation et le rayonnement diffusé (inutile)**
  - **Donc améliore la qualité d l'image et assure la radioprotection.**
- **Le faisceau homogène de RX traverse un milieu hétérogène et subit une atténuation (absorption, affaiblissement) fondée sur :**
  - **La grande pénétration des RX dans les tissus traversés,**
  - **Leur inégale absorption par divers constituants de l'organisme**

3-L'atténuation du faisceau de RX ++

- **Cette atténuation s'exprime selon:** $\varphi(x) = \varphi_0 e^{-\mu x}$
- **φ_0: nombre de photons incidents/unité de surface et de temps**
- **φ: nombre de photons transmis / unité de surface et de temps**
- **x : épaisseur du milieu traversé en cm.**
- **μ: coefficient d'atténuation en cm^{-1}**
- **La valeur de μ est liée à Z et à la densité du milieu**

- Z du milieu : - Tissus mous (H_1 ; C_6 ; N_7 ; O_8); - Os (P_{15} ; Ca_{20}): atténuation +++

- Densité ρ : tissus mous (1060); graisse (0,900); eau (1000); Air (0,001)

- **L'atténuation: importante si x et ρ sont élevées: atomes lourds: os**

4- Image radiante
Notion de Contraste Radiologique ++

- **Le faisceau homogène (I) est inégalement atténué par l'organisme sort hétérogène avec des intensités différentes I_1 et I_2 suivant les milieux traversés. Il constitue l'image radiante: non visible par l'œil.**
- **Pour quantifier cette différence : notion de *contraste radiologique*.**
- **Le contraste entre deux points de l'image radiante d'intensité respective I_1 et I_2**

$$C = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}$$

- C↘ par le rayonnement diffusé (↗avec l'épaisseur x)

- C lié à (μ_1 et μ_2) : qualité du RX et nature du milieu

Le contraste correspond aux différences d'intensité du noircissement de l'image

Terminologie de base en radiologie +

- **L'information contenue dans l'image radiographique varie selon la nature du tissu traversé. Quatre tonalités (densités) fondamentales: os, muscle, graisse,air**
- **Opacité = zone de forte densité = (blanche)**
- **Clarté = zone de moindre densité : (sombre ou noire)**
- **Structure dense (Z élevé), comme l'os, atténue (absorbe) beaucoup le RX, et s'exprime en blanc: « il est radiopaque »**
- **Structure aérique (Z faible), comme les poumons, atténue peu le RX et apparait sombre ou noire: « hyperclarté »**
- **Structure intermédiaire: tissus mous peu contrastés, C↗ par des produits de contraste à Z élevé: Baryum (Z = 56) et l'Iode (Z = 53).**

5- Les systèmes de récepteurs++

- **Ils convertissent l'image radiante invisible en une image visible.**
- **Détecteurs statiques écran-film fournissant une image sur film**
- **Détecteurs dynamiques : permettent une étude cinétique: cœur-**

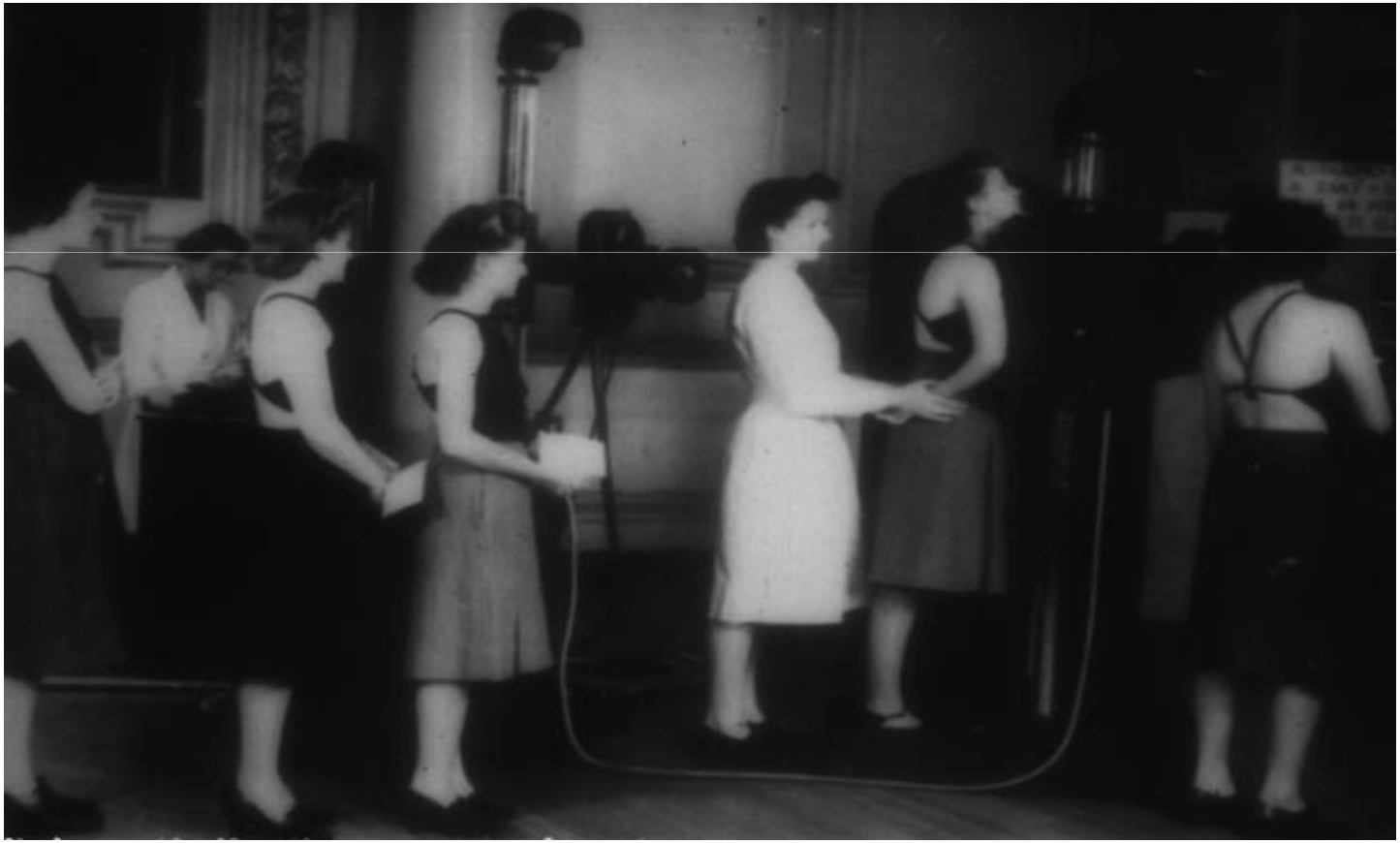
  - Radioscopie traditionnelle: image de mauvaise qualité

  - Amplificateur de luminance avec écrans luminescents
- **Détecteurs numériques :**

- **l'image numérique: révolution de l'imagerie où le détecteur sensible aux RX a remplacé le film.**

L'équipement en Radiologie

- Radiologie standard
- CT axial transverse
- Amplificateur de luminance
- CT hélicoidal et CT multicoupes



La Radiographie Classique ++

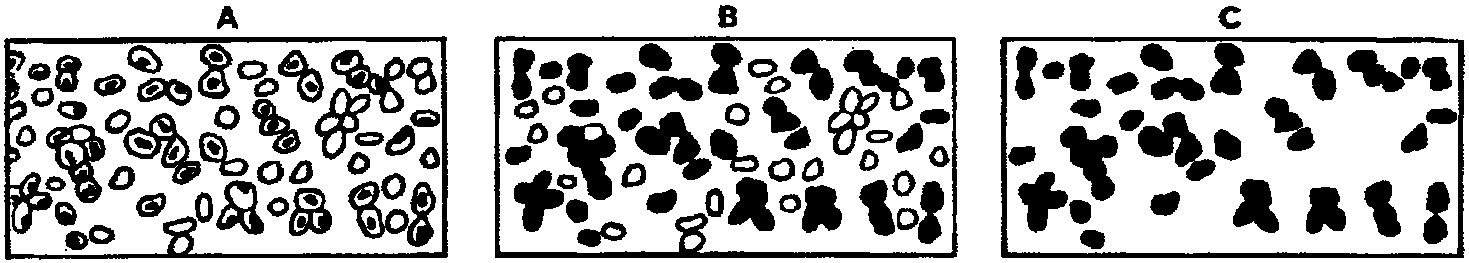
Récepteur écran-film : cassettes avec écran scintillateur et film

- **Sous l'effet du RX, l'écran émet un rayonnement lumineux.**
- **Il crée une image latente par impression du film sensible aux RX.**
- **Le film, à base de Bromure d'Argent est ensuite développé à l'abri de la lumière**
- **L'image latente: révélée à l'aide de procédés chimiques (toxiques)**
- **Cette image traduit l'atténuation inégale des RX selon les tissus (Z et la densité ρ du milieu) avec nuances de gris allant du blanc au noir et créant un contraste d'un point à l'autre.**
- **Coût modeste mais Document unique (consulté sur place)**

Le film photographique +

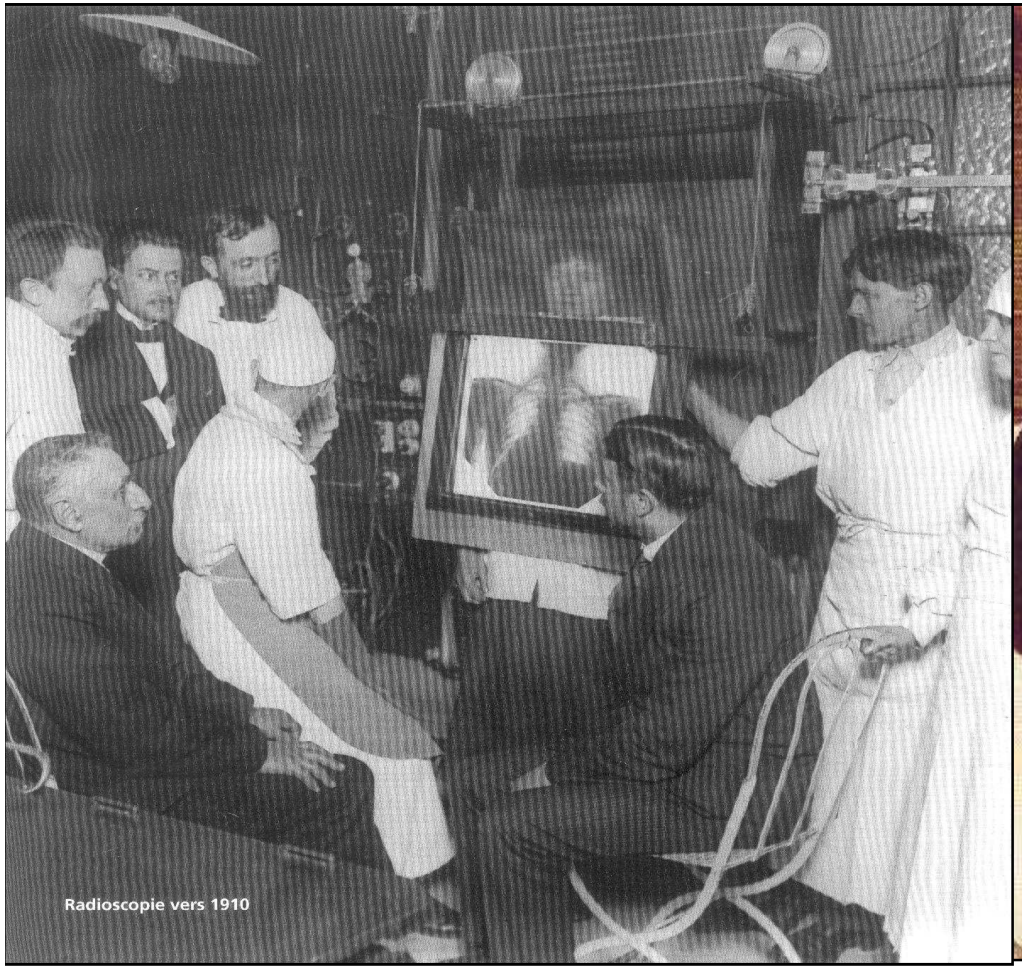
C'est le plus simple et le plus ancien détecteur formé de cristaux Br Ag:

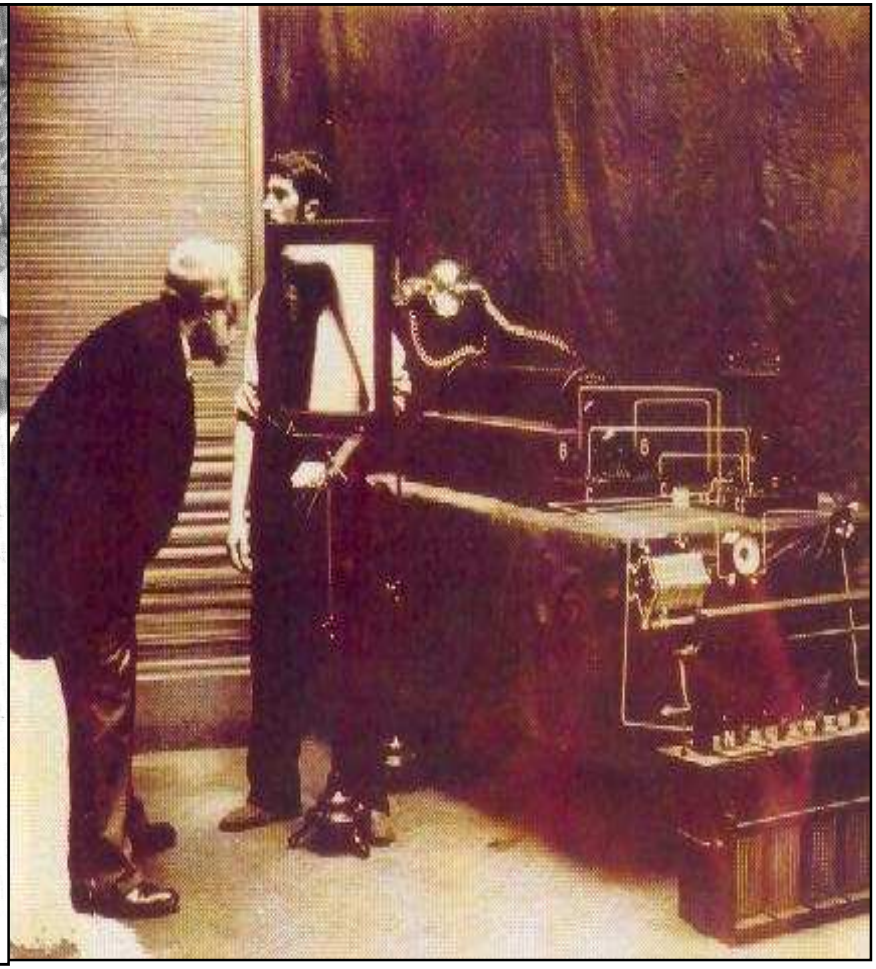
- **$Br^- Ag^+ \xrightarrow{RX} Br + e^-$ et $Ag^{++} + e^-$: Cristaux exposés: image latente (A)**
- **Révelation (B): Ag Métallique**
- **Fixation: noircissement du Film (C):cristaux non exposés sont éliminés**



Formation de l'image radiographique

L'efficacité du film radiologique est augmentée s'il est placé entre deux écrans renforçateurs dans une cassette.


Radioscopie vers 1910



Radiographie avec produits de contraste ++

- **Pour une structure intermédiaire, peu contrastés (tissus mous) on augmente le contraste entre deux milieux par des produits de contraste (PC) :**
- **PC radiotransparents, apparaissant en noir sur l'image, comme l'air ou un gaz;**
- **PC radio-opaques (Z élevé), apparaissant en blanc sur l'image:**
  - **Sulfate de baryum Ba So_4 ou baryte (Z = 56) pour radiographie du tube digestif : TOGD; transit du grêle, lavement baryté (colon);**
  - **PC iodés (Z = 53) explore l'appareil circulatoire (artériographies)…; reins (UIV)…**
- **En radioprotection, le plomb Pb_{82} protège contre les RI**

Examens avec PC en radiologie

Différentes procédures en radiologie

Radioscopie traditionnelle +

1940

L'image radioscopique se faisait dans le noir absolue avec un écran de sulfure de zinc placé directement derrière le patient, qui s'éclaire sous l'action des RX

-L'image obtenue en continu et en temps réel est grossière et peu lumineuse.

- D'où irradiation excessive du patient et de l'opérateur!

- L'amplification de l'intensité lumineuse a amélioré la qualité de l'image

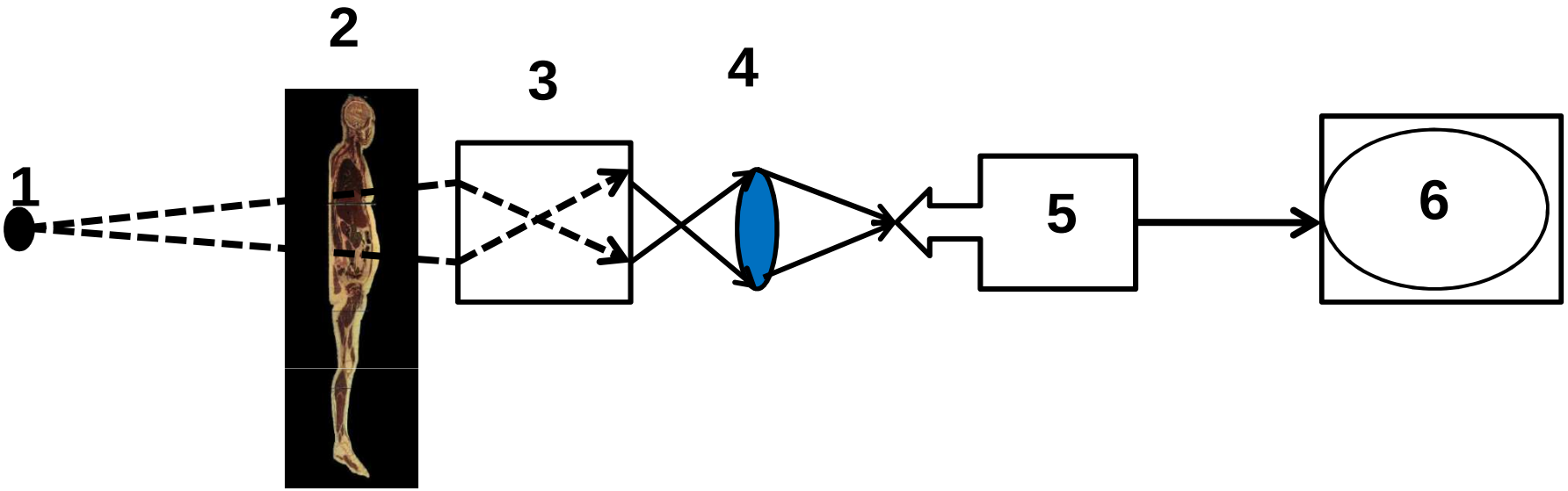
Amplificateur de Luminance (AL) +++

Principe de fonctionnement

- **Système constitué de deux écrans convertisseurs et d'un tube à vide.**
- **1er écran : - Une couche sensible aux RX convertit les RX en photons lumineux.**

  - Une photocathode qui, sous l'action des photons lumineux, libère par effet photo-électrique des électrons de luminance faible
- **Tube à vide: Il permet l'accélération des électrons et leur focalisation vers une fenêtre de sortie: d'où augmente l'intensité du signal**
- **2ème écran: recueille les électrons accélérés et les convertit en image de forte intensité lumineuse**
- **L'image finale est transmise sur un écran de télévision**

Schéma d'un Amplificateur de Luminance++



1- Faisceau de RX

2- Patient

3-Amplificateur de luminance

4-Optique

5- Caméra de TV ou CCD

6-Récepteur de TV

« Radiodiagnostic» M.Tubiana, Elsevier Masson, 2004

Amplificateur de Luminance (suite)

Double rôle: +++

- **Intercepter le faisceau de RX et le convertir en photons lumineux.**
- **Amplifier ou intensifier ce signal lumineux.**

Intérêts de la scopie :

- **Etude cinétique d'organes et suivi d'actes chirurgicaux.**
- **Visualise des images en temps réel**
- **Il est à la base de la numérisation d'image en imagerie.**

La Radiographie Numérique

- **Un détecteur sensible aux photons, remplace le film classique.**
- **Ce détecteur, selon la technologie utilisée, fournit directement ou indirectement les données analogiques de l'image à l'ordinateur qui les transforment par calcul en données numériques: Principe de l'image numérique**
- **Différentes technologies numérisent l'image radiologie:**

- **Radiologie Computérisée CR: Écrans Radio Luminescents à Mémoire ERLM**
- **«Digital Radiography» DR indirecte: utilise des détecteurs , la lecture est réalisée par caméra CCD (capteur à transfert de charges).**
- **DR directe: utilise des détecteurs à capteur plan. Les charges électriques sont converties directement en données numériques**

L'imagerie numérique avantages++

L'imagerie numérique ne cesse de se développer permet au médecin:

- **un diagnostic plus fiable,**
- **de disposer de l'information à tout moment, sur place et à distance, archivée et enregistrée sur support (disque dur, USB,CD..) transmise via réseaux sécurisés ou consultée directement sur écran: ce qui est rapide, économique, écologique**
- **de réduire les gestes invasifs: «explorer l'intérieur depuis l'extérieur»**
- **de réduire l'exposition aux RI d'où minimise l'irradiation et respecte les normes de radioprotection.**

Appareils du Radiodiagnostic

Statif pour radiographie standard

Constitution générale:

- **Une table où le patient est allongé**
- **Un tube de RX en face du détecteur**
- **Une console d'ordinateurs pour surveillance et suivi de l'exploration**

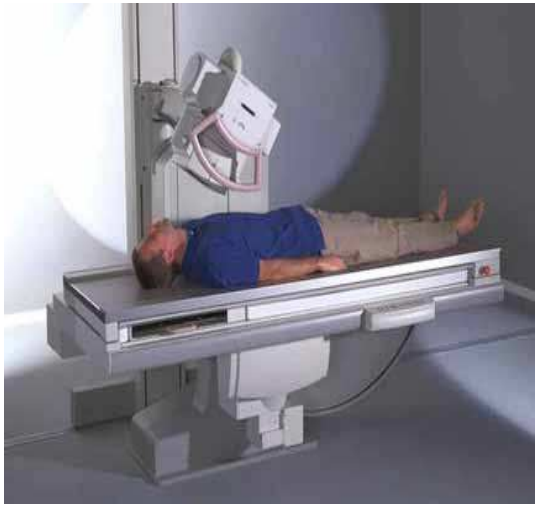
Amplificateur de luminance

Appareils monté sur un portique en forme de C avec le tube à RX sous la table où se trouve le patient.

Radiologie conventionnelle

- **Poumons (pneumologie).**
- **Os, articulations: orthopédie, rhumatologie, orthodontie.**
- **Seins (mammographie).**
- **Avec produit de contraste :**
  - **Iodé : vaisseaux sanguins , cerveau, rétine, cœur….reins et voies urinaires**
  - **Sulfate de baryum : Tube digestif**

Equipements en radiologie conventionnelle



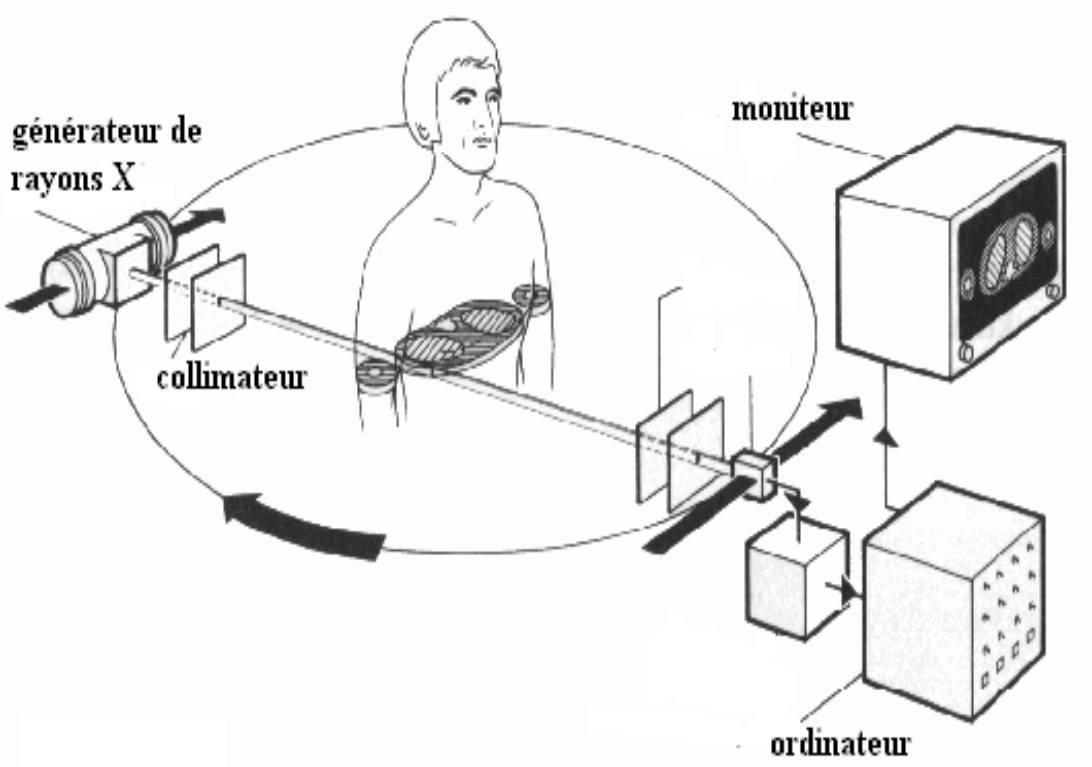
Appareils de radiologie et différentes procédures

Mammographie

Radiologie interventionnelle

Radiologie standard et TDM

- **Imagerie planaire (2D) = radiographie conventionnelle**
- **Imagerie tomographique (3D) = tomodensitométrie (scanner)**



Scanner X : acquisition de projections 2D sous différentes incidences angulaires

Scanner ou Tomodensitométrie (TDM)

ou CT (Computed Tomography)

- Principe de fonctionnement

- Evolutions de l'équipement

1- TDM Axiale Transverse

2- Scanner hélicoïdal spiralé

3- CT-Scan Multi-barrettes

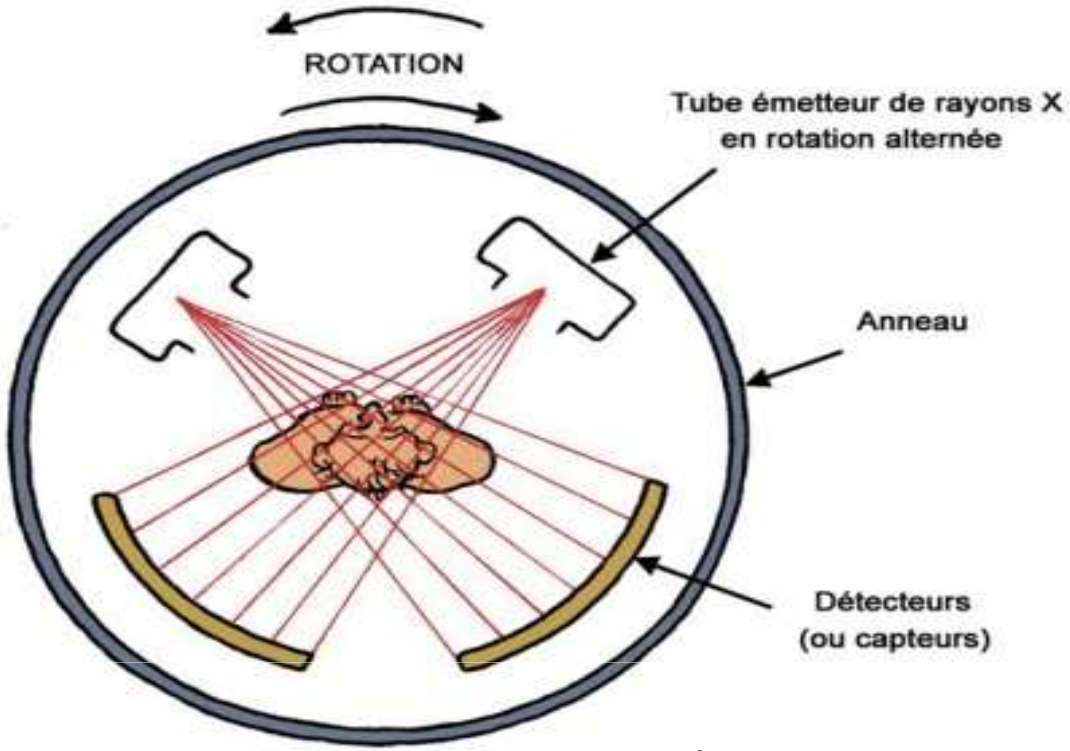
Principe de fonctionnement du Scanner++

Position du problème:

- **En radiographie classique : les ombres des organes traversés sont confondues**
- **Le scanner, ou TDM , résout ce problème en réalisant, pour la zone étudiée des images de coupes fines sous différents angles :**
- **La TDM permet ainsi une visualisation "en profondeur".**

Constitution de base d'une TDM++

- **Patient allongé sur une table qui se déplacer à travers un anneau**
- **Il contient le tube émetteur de RX et une série de détecteurs :**
  - **Le tube des RX au lieu d'être fixe, tourne autour du patient.**
  - **Une série de détecteurs disposés en couronne en face du tube de RX; mesurent l'intensité du faisceau transmis de RX à chaque rotation**
- **Un puissant système informatique traite en quelques secondes les millions de données acquises durant l'examen et les traduit en images sur un écran (imprimées ensuite sur film photographique).**



Scanner : Principe de fonctionnement

Éditions PEMF, BT2 « L'imagerie médicale"

Avantages de la TDM

- **Excellente qualité des images**
- **Doses d'irradiation impliquées sont réduites.**
- **Localise mieux un organe par rapport à un autre et détecte mieux les anomalies**
- **Sert de guide lors de ponctions ou biopsies en profondeur: évite une opération.**

Unité UH en TDM ++

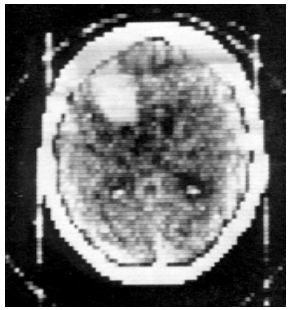
L'information élémentaire « le μ » est calculée par ordinateur pour chaque point du plan de coupe. Elle est exprimée en unité Hounsfield (UH), et sa valeur est affectée d'une couleur sur une échelle de gris avec deux extrêmes:

- **Le blanc pour l'os (+1000 UH)**
- **Le noir pour l'air (-1000 UH)**
- **Le gris intermédiaire pour l'eau (0 UH).**

RadiologyInfo.org ACR - RSNA

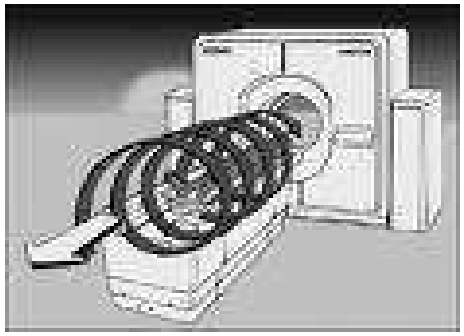
C'est une technique dont le principe est connu depuis 1917, elle n'a été appliquée, en pratique que vers 1972 par Hounsfield .

Différentes générations de TDM



1- TDM Axiale Transverse ++

- **Le patient étant couché et immobile sur le dos, la table se déplace pas à pas sur toute la région à examiner.**
- **A chaque arrêt un faisceau de RX tourne autour du patient.**
- **L'image tomodensitométrique" correspond à des tranches successives ou coupes transverses (réalisée dans un plan axial) de la région examinée.**
- **Examen lent (près d'une heure),**



2- Scanner hélicoïdal spiralé++

- **Tube à RX et détecteurs tournent sans s'arrêter autour du patient alors que la table avance à vitesse constante**
- **Le faisceau de RX décrit une hélice autour du patient et réalise ainsi une acquisition continue: scanner à rotation continue.**
- **Acquisition rapide, meilleure qualité de l'image et acquisition 3D.**
- **Mais manque de précision dans certaines coupes.**

3- CT-Scan Multi-barrettes +++

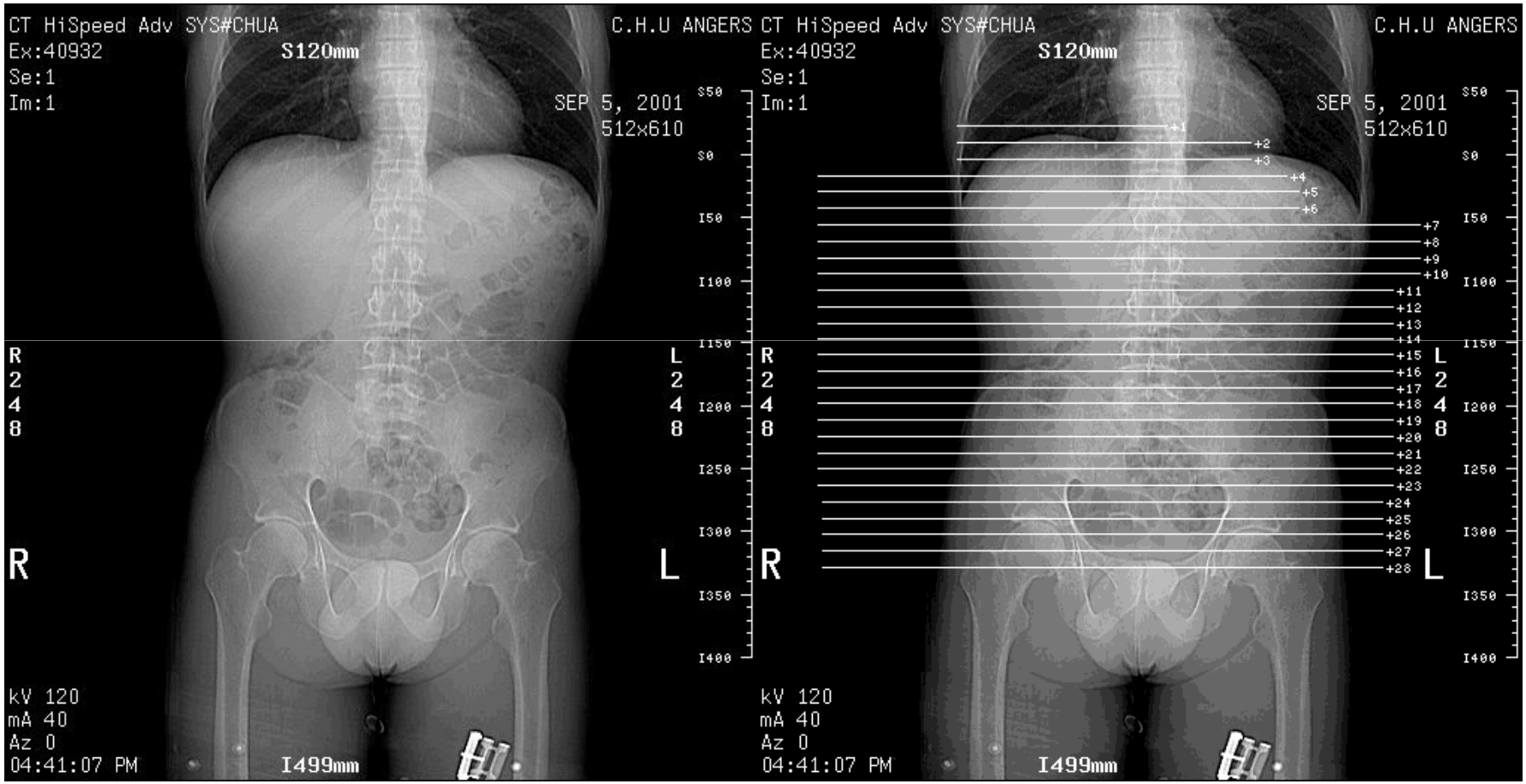
- **Tube à RX tourne autour du patient et avance simultanée de la table du patient: Exploration est réalisée en quelques secondes.**
- **Images dans tous les plans de l'espace (2D: coronal, sagittal, axial) et d'effectuer des reconstructions en 3D**
- **Le scan est constitué de récepteurs, barrettes disposées côte à côte**
- **Les CT ont 4, 16, 64, 128 barrettes.. permettant des acquisitions de 4, 16, 64, 128… images par rotation du tube (0,75sec: 4 barrettes).**
- **Performances du CT:**
- **- Acquisition rapide et excellente qualité de l'image**

  - Acquisition en 3D : Images dans tous les plans.

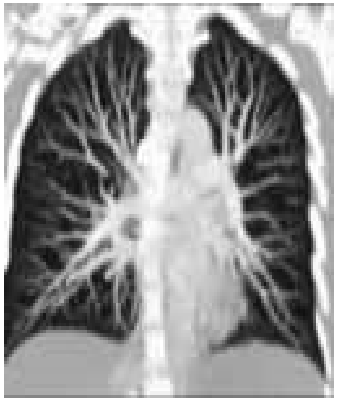
  - Nouvelles applications: Angio-CT: coroscan, colonoscan…

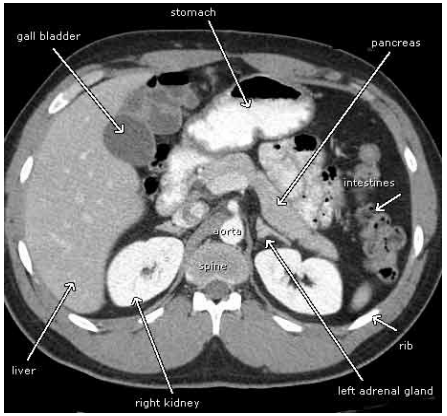
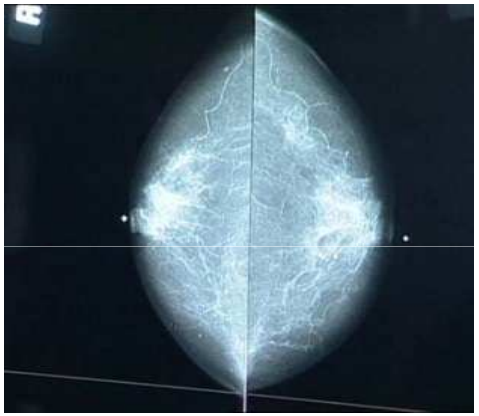
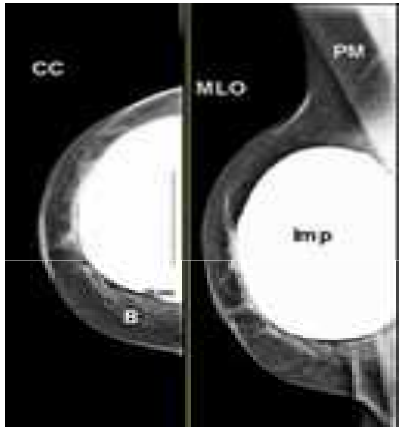
TDM multibarrettes

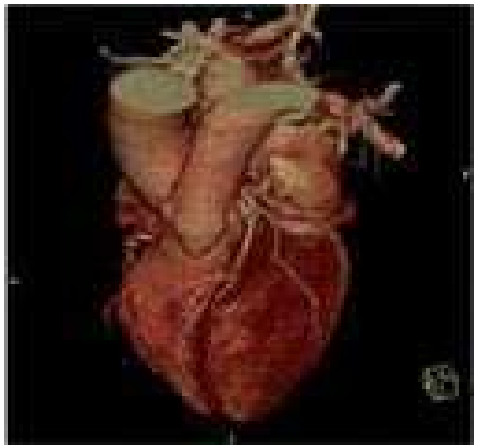
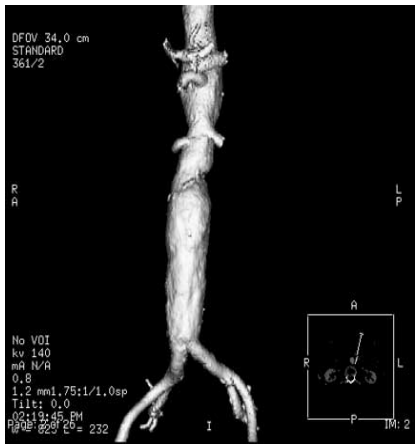
Réalisation d’une acquisition CT

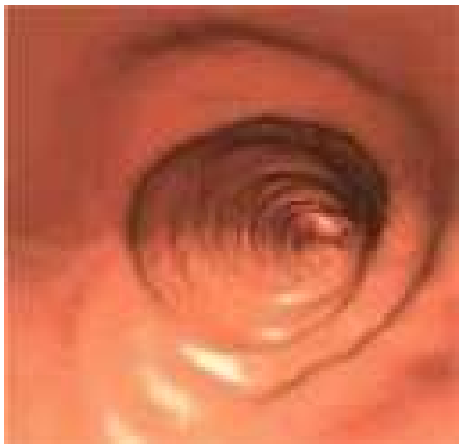


Vue de Repérage




stomach
gall bladder
pancreas
intestines
aorta
spine
rib
liver
right kidney
left adrenal gland


CC
MLO
PM
Imp



DFOV 34.0 cm
STANDARD
361/2
No VOI
kv 140
mA N/A
0.8
1.2 mm1.75:1/1.0sp
Tilt: 0.0



Références

- « Radiodiagnostic» ouvrage de Jean-Michel Tubiana, Lionel Arrivé, Elsevier Masson, 2004
- JP Trigaux – Radiologie – UCL Mont Godinne
- Pratique des techniques du radiodiagnostic. (3ème édition) Par JP Monnier, JM Tubiana
- www.cnebmn.jussieu.fr : Collège National des Enseignants de Biophysique et de Médecine Nucléaire
- Université Médicale virtuelle Française: Accueil > Recherche thématique>biophysique
- Catalogue et index des sites médicaux francophones (CISMEF)
- Notions de radiobiologie et de radiopathologie : cours de l'INSTN 2007-08
- D.J. GAMBINI / R. GRANIER, décembre 2000. Manuel pratique de radioprotection. Editions Médicales Internationales.
- Rapport sur les travaux de la 54ème session de l'UNSCEAR, 2006, supplément N° 46.
- Sites universitaires et d'imagerie francophones :
  - *www.med.univ-rennes1.fr* www.chu-rouen.fr/ *www.med.univ-rennes1.fr*.
  - www.univ-angers.fr/ www.univ-nantes.fr/.. http://www.cvc.u-psud.fr*www.vulgaris-medical.com/*. *www.hopcantfr.ch/* *documents.irevues.inist.fr*
  - *Info-radiologie.ch* *Romain LACROIX - Manip.Rx CHU Rouen*
  - http://www.cvc.u-psud.fr (S.Furois, CNRS ,Centre de Vulgarisation de la Connaissance, Univer Paris-Sud XI)

- Remerciements aux collègues radiologues: Pr. M.Cherkaoui et Pr. J. Elquessar CHU Internat Cheikh Zaid