

L2 – GB – Imagerie Médicale

Radiographie

Dr. ZOUAGUI T.

USTO – Faculté GE - Département d'Électronique

prof.zouagui@gmail.com

Introduction

- Première image radiographique date de 1895
- Bonne qualité d'image avec informations très variées (fractures osseuses, cancer des poumons, ...).
- Technologie arrivée à maturité.
- Imagerie par transmission de RX.
- Image de projection (3D → 2D).
 - Information anatomique superposée.

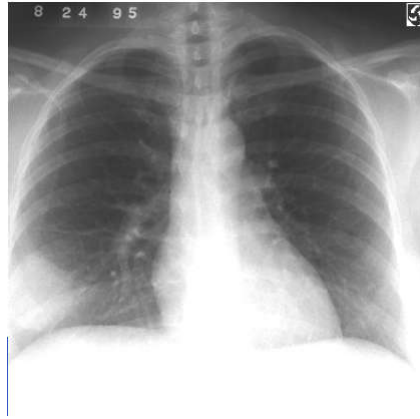


2

Introduction



Imagerie par rayons X



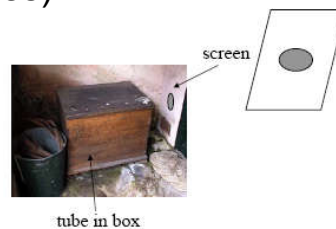
Introduction



Imagerie par rayons X

Découverte des rayons X

- Découverts en 1895 par Wilhelm Röntgen
 - Accidentellement en faisant des expériences sur des tubes cathodiques et des écrans fluorescents.
 - Il leur a attribué le nom '**rayons X**' (X comme l'inconnue en Mathématiques).



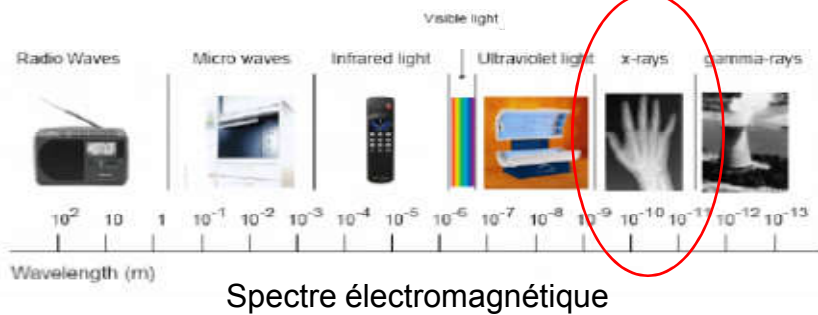
Wilhelm Conrad Röntgen : Prix Nobel en 1901



Première image d'une main humaine : celle de Mme Röntgen

Rayons X

- Les rayons X (**RX**) sont des ondes EM à haute fréquence > à 3×10^{16} Hz
- Longueur d'onde comprise entre 10 pico mètres et 10 nanomètres. $10 \text{ pm} < \lambda < 10 \text{ nm}$.



Spectre électromagnétique

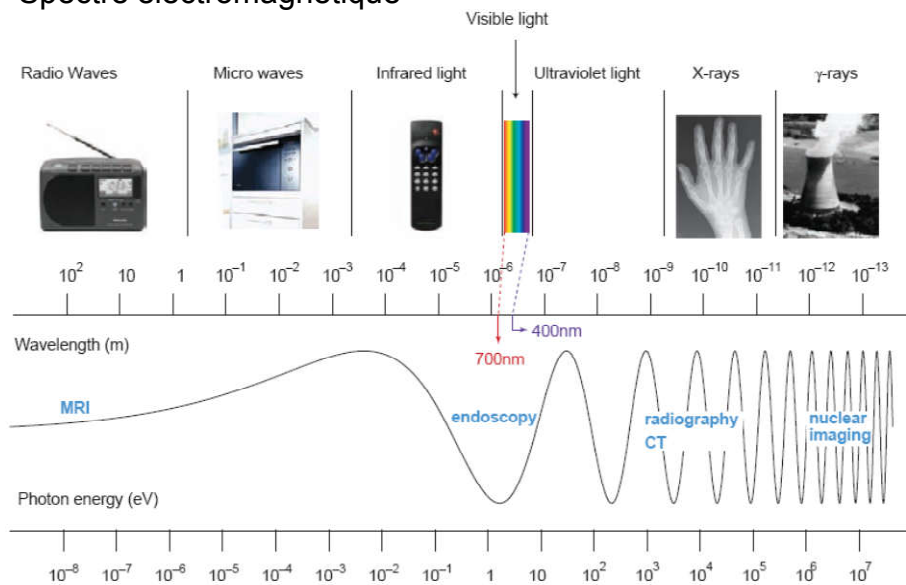


Figure 2.1 The electromagnetic spectrum.

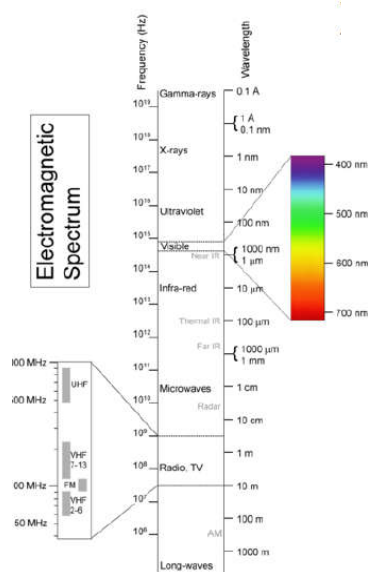
Table 2.1 Electromagnetic Wave Spectrum (from [Enderle et al.])

Energy (eV)	Frequency (Hz)		Wavelength (m)
4×10^{-11}	10^4	AM radio waves	10^4
4×10^{-10}	10^5		10^3
4×10^{-9}	10^6		10^2
4×10^{-8}	10^7		10^1
4×10^{-7}	10^8	Short radio waves FM radio waves and TV	10^0
4×10^{-6}	10^9		10^{-1}
4×10^{-5}	10^{10}		10^{-2}
4×10^{-4}	10^{11}	Microwaves and radar	10^{-3}
4×10^{-3}	10^{12}		10^{-4}
4×10^{-2}	10^{13}		10^{-5}
4×10^{-1}	10^{14}	Infrared light	10^{-6}
4×10^0	10^{15}		10^{-7}
4×10^1	10^{16}		10^{-8}
4×10^2	10^{17}	Visible light	10^{-9}
4×10^3	10^{18}		10^{-10}
4×10^4	10^{19}		10^{-11}
4×10^5	10^{20}	Ultraviolet light	10^{-12}
4×10^6	10^{21}		10^{-13}
4×10^7	10^{22}		10^{-14}

$$(1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J})$$

9

Rayons X



Wavelength: 0.01-10 nm
 Frequency: 30 petahertz to 30 exahertz
 (3×10^{16} to 3×10^{19})
 Energies: 120 eV to 120 keV

Soft X-rays: 0.12 keV to 30 keV
 Hard X-rays: 30 keV to 120 keV

Soft X-rays do not penetrate matter where
 hard X-rays do

10

- L'énergie E de ces **photons** va de quelques eV à plusieurs dizaines de MeV.

$$E = h \cdot f = \frac{hc}{\lambda}$$

h : Planck's constant ($4.135 \cdot 10^{-15}$ eVs)

c : speed of light ($300 \cdot 10^6$ m/s)

λ : wavelength (on the order of 10^{-10} m)

thus, E is in on the order of keV

h is Planck's constant (6.626×10^{-34} J s)

- Plus la **longueur d'onde du RX** est **courte**, plus son **énergie est élevée**.
- Les rayons de longueur d'ondes **proches** de la plage des **ultraviolets** dans le spectre électromagnétique, sont appelés **RX mous**.

11

- Les rayons de longueur d'ondes plus **courte** proche de la plage des rayons **gamma**, voire débordants de cette plage, sont appelés **rayons X durs**.
- Rayonnements dits '**ionisants**' du fait de l'énergie importante des photons (donc **dangereux**).
- Les **RX** sont des **photons** produits par les **électrons** des atomes.
- Les Rayons **gamma** sont produits par les **noyaux** des atomes.

12

• Propriétés des RX

- Ils **pénètrent** facilement la 'matière molle' (matière solide peu dense et constituée d'éléments légers comme le C, O₂ et N).
 - La **peau**, la **graisse**, les **muscles**...
- Ils sont facilement **absorbés** par la 'matière dure' (matière solide constituée d'éléments lourds).
 - Essentiellement les **os**

C'est ce qui permet l'imagerie médicale: ils **traversent** la **chair** et sont **arrêtés** par les **os**.

13

Formation des RX



Figure 1.9

Tube radiogène à anode tournante de 140 mm de diamètre, en graphite.

1. Soudures verre-métal sur le versant cathodique. 2. Cathode, ensemble filaments-pièce de concentration. 3. Anode tournante dont la piste en tungstène (cible) est dépolie sous l'action de bombardement électronique. 4. Rotor situé à proximité immédiate de la paroi de verre au niveau du col de l'ampoule, pour limiter au maximum la distance séparant rotor et stator, favorisant ainsi l'application des champs électromagnétiques.

14

Formation des RX

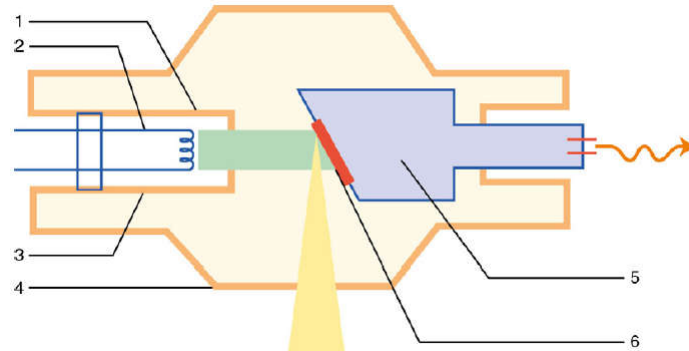


Figure 1.8

Schéma d'un tube radiogène à anode fixe.

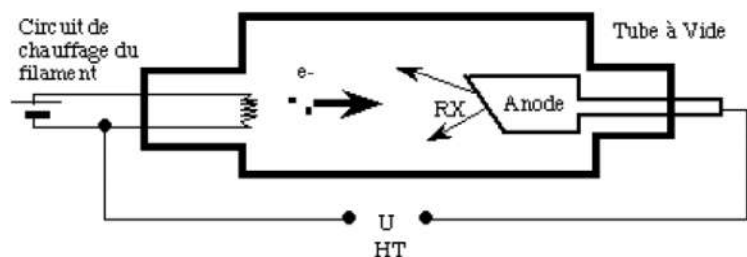
La différence de potentiel créée entre la cathode (filament + pièce de concentration) et l'anode accélère les électrons produits par effet thermo-ionique en chauffant le filament. Le faisceau électronique ainsi produit (coloré en vert) est freiné dans une cible de tungstène (colorée en rouge) sertie dans un bloc de cuivre (coloré en bleu), qui permet d'évacuer la chaleur par conduction.

1. Pièce de concentration. 2. Filament. 3. Cathode. 4. Tube. 5. Anode (cuivre). 6. Cible anodique tungstène W ($Z = 74$).

15

• Formation des RX

- Deux mécanismes sont à l'origine de la formation des RX dans un **tube radiogène** : **l'émission générale** ou **l'émission caractéristique**.
- Dans les deux cas, les RX sont le fruit de l'interaction entre un flux **d'électrons** lancé à grande vitesse sur une cible matérielle.



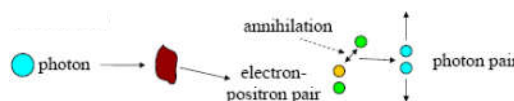
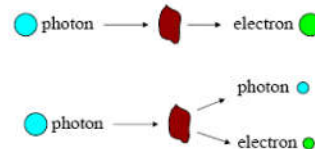
16

- Les RX sont produits par l'interaction avec la matière **d'électrons très énergétiques** qui convertissent leur **énergie cinétique** en **radiation électromagnétique**.
- Les électrons sont émis thermiquement par une cathode chauffée et accélérés vers l'anode sous l'effet du potentiel électrique (~kv).
- Au contact avec l'anode, l'énergie cinétique des électrons se transforme :
 - Dans 99% des cas: en chaleur
 - Dans 1% des cas: perte d'énergie cinétique et émission d'un **photon** (interactions avec un noyau positif).

17

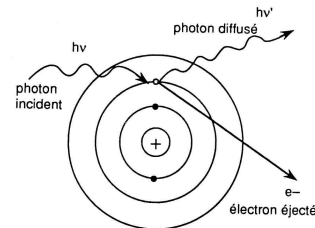
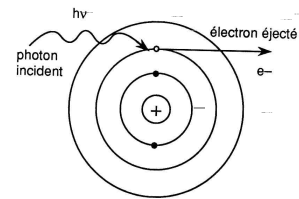
Interactions RX - tissus

- Les photons sont détectés par leur interaction avec la matière, qui produisent des particules chargées.
 - Absorption **photoélectrique**
 - Diffusion de **Compton**
 - Absorption par **production de paire**



18

- **Effet photoélectrique:** le photon transmet toute son énergie à un électron et disparaît.
- **Diffusion Compton:** le photon incident transmet une partie de son énergie à un électron et donne naissance à un photon diffusé (énergie inférieure, direction différente).
- **Effet photoélectrique et diffusion Compton** = les 2 interactions élémentaires les plus importantes dans le domaine médical.



19

Principe de l'imagerie par RX

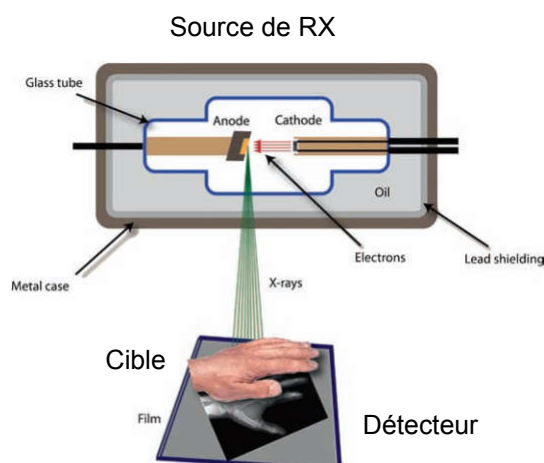


Figure 2.45. X-ray projection imaging. C.R.B. Merritt diagram.

20

Principe de l'imagerie par RX

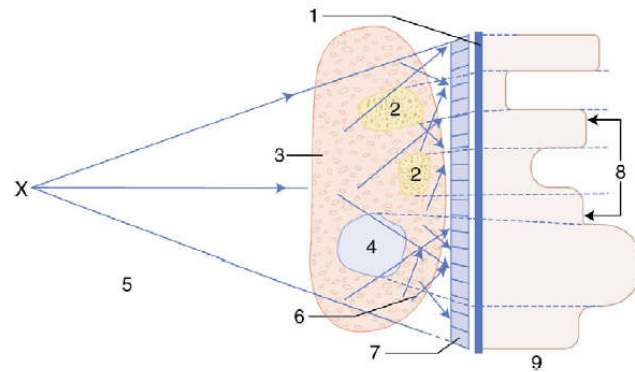


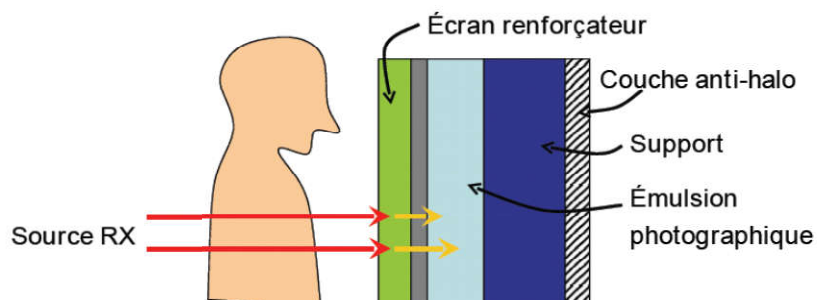
Figure 2.1

Représentation du profil d'intensité d'un faisceau de rayonnement X au niveau d'un détecteur, traduisant l'atténuation différentielle de l'intensité du rayonnement par les divers organes traversés.

1. Détecteur (écran-film, intensificateur d'image, numérique). 2. Os. 3. Tissus mous. 4. Air. 5. Collimation. 6. Rayonnement diffusé. 7. Grille antidiffusion. 8. Image radiologique primaire. 9. Intensité au niveau du détecteur

21

Principe de l'imagerie par RX



Émulsion sensible aux RX: cristaux de bromure d'argent (AgBr)

Support: transparent à la lumière

Écran: convertit les RX en lumière (contient du phosphore)

22

- Impression photographique par les RX sur un film argentique.
- Le film radiologique est un film sensible à la lumière visible. Les RX après avoir traversé la zone explorée vont faire scintiller un écran renforçateur, placé avec le film dans une cassette.
- Cette lumière forme l'impression de l'image sur le film radiographique.
- Écran: Convertir l'image radiante (rayonnement transmis par l'objet) en image visible.

23

Principe de l'imagerie par RX

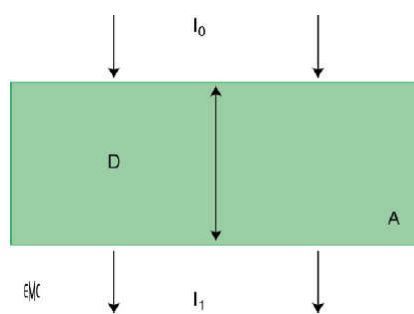


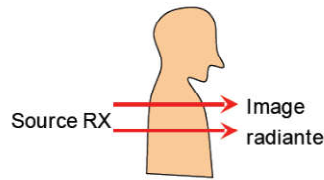
Figure 2.2

Intensité I_1 d'un faisceau de rayonnements X monoénergétique d'intensité initiale I_0 après la traversée d'un matériau A d'épaisseur D.

$$I_1 = I_0 e^{-\mu D} \quad \text{loi de Beer-Lambert}$$

24

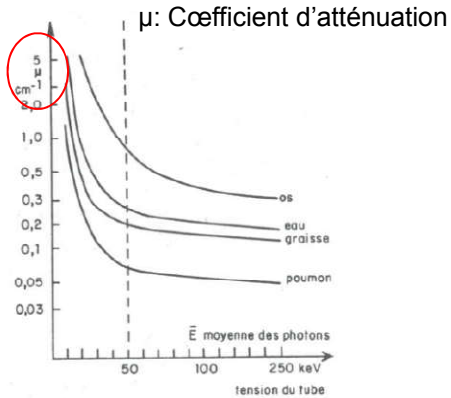
- **Absorption différentielle des RX**



Atténuation des RX

$$I = I_0 \exp(-\mu x)$$

x épaisseur du tissu

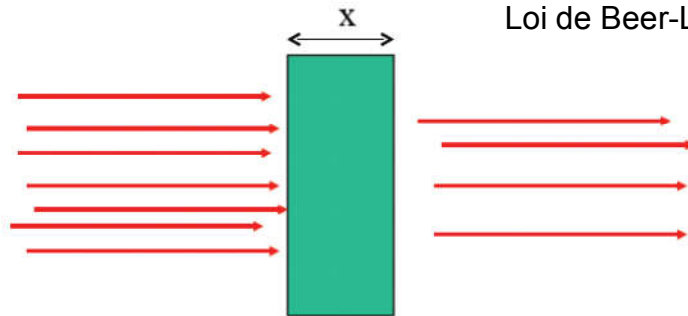


- L'image radiographique résulte d'une **différence d'atténuation des RX** dans les milieux traversés.

25

$$I = I_0 \exp(-\mu x) = I_0 \exp(-\mu/\rho \cdot \rho x)$$

Loi de Beer-Lambert



μ : coefficient d'atténuation linéaire
Unité: cm^{-1}

$$\mu = \tau + \sigma$$

Absorption Photoélectrique Diffusion de Compton

$$\mu^* = \mu/\rho \quad [\text{cm}^2/\text{g}]$$

ρ : densité du tissu, μ^* : coefficient massique d'atténuation

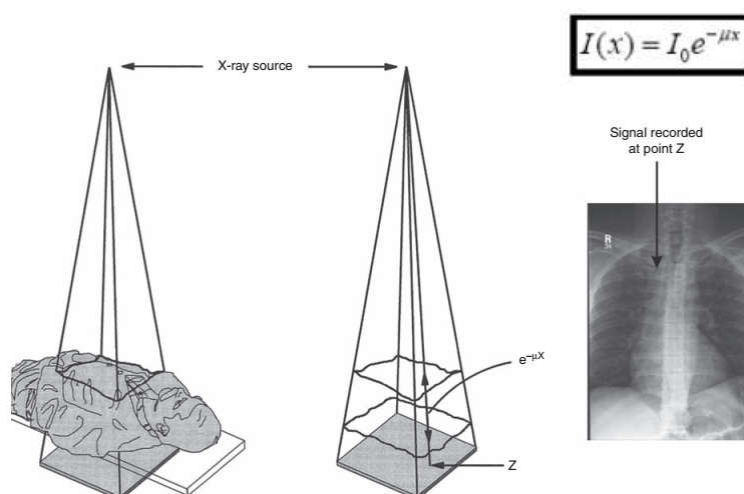
26

Mass attenuation coefficient μ/ρ

	50 keV	100 keV	200 keV
Air	0,208	0,154	0,122
Water Eau	0,227	0,171	0,137
Fat Graisse	0,212	0,169	0,136
Muscle Muscle	0,226	0,169	0,136
Bone Os	0,424	0,186	0,131
Lead Plomb	8,041	5,549	0,999

27

- La **densité optique** à chaque position sur le film correspond à la caractéristique d'atténuation ($e^{-\mu x}$) du patient à la même position.



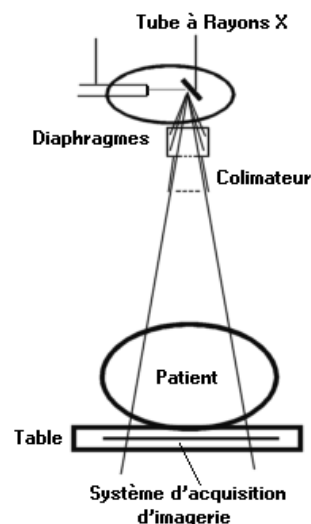
28

- Les os très denses apparaissent en **clair** et les organes (poumons) sont visibles sur la radio d'une couleur beaucoup plus **sombre**.
- L'image est créée par la différence d'opacité des tissus aux RX
- On utilise un **produit de contraste** pour imager des tissus qui n'ont pas une opacité spécifique.

29

• Systèmes de radiographie

- La réalisation d'une radiographie nécessite une source de rayons X, un système de collimation et d'enregistrement du rayonnement. Pour ce dernier élément il existe les cassettes avec un film photographique, les écrans photosensibles, les amplificateurs de brillance et les capteurs électroniques. Le réglage de l'exposition aux rayons X s'effectue en modulant la tension (kVolt) et l'ampérage (mAmpère).



30



Systèmes de radiographie



31



Tablier de protection

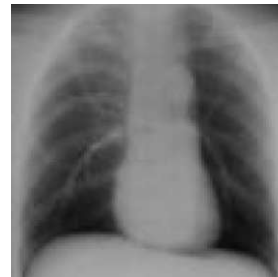
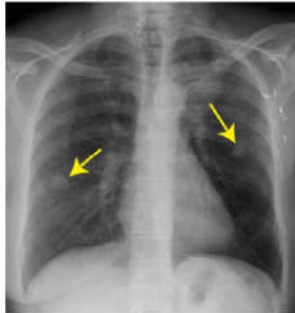


Gant à ouverture palmaire

32

- **Utilisation clinique**

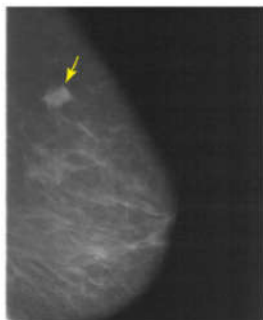
- Poumons, seins, dents, ...
- Squelette, ...



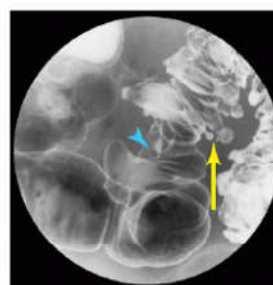
Radiographic chest image showing multiple lung metastases

Fractures, infections pulmonaires, ...

33

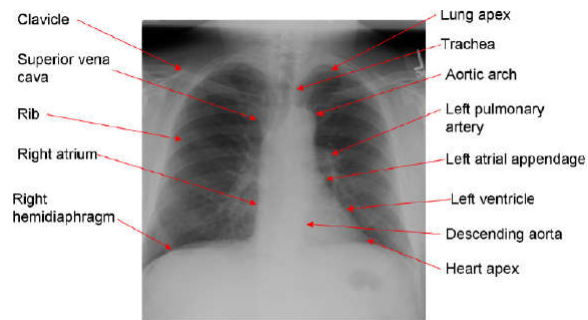


Dense opacity with spiculated borders in the left breast, which suggests a malignant lesion

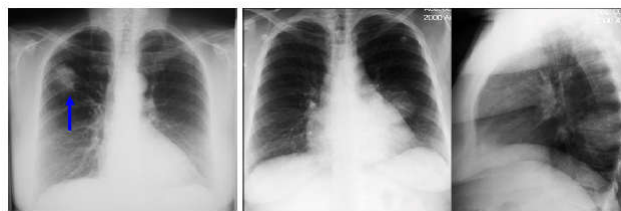


Double contrast (barium + gas insufflation) enema with multiple diverticula in the sigmoid colon (yellow arrows). Polypoid mass proliferating intraluminal (blue arrowhead, only visible on the spotview).

34



Normal Chest X-ray



Abnormal Chest X-ray

35

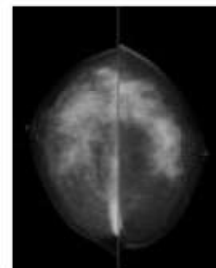
Mammographie

Utilisation de l'image radiologique pour:

- Détection et diagnostic du cancer du sein.
- Localisation pré-opératoire de tumeurs.
- Guidage pendant une biopsie.

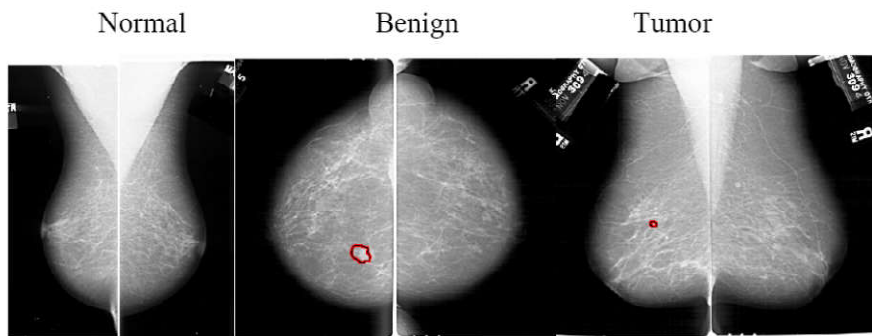
Caractérisation visuelle d'un cancer:

- Morphologie de la tumeur / masse.
- Présence de dépôts minéraux, appelés micro calcifications (0.1mm!).
- Déformation de la structure des tissus.
- Asymétrie entre les régions correspondantes entre le sein droit et gauche.



36

Mammographie

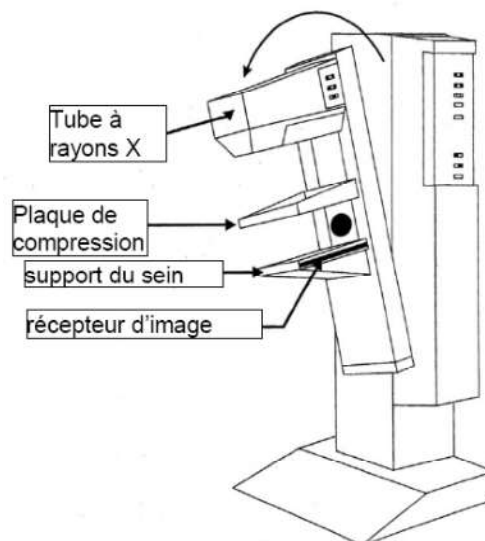


<http://marathon.csee.usf.edu/Mammography/Database.html>

La mammographie de dépistage permet de découvrir des tumeurs à leur début, lorsqu'elles ne sont pas encore palpables.

37

- Dispositif de mammographie



38

- **Types d'examens radiologiques**

- Radioscopie

- L'image radiante est interceptée sur un écran fluorescent

- **Radiographie**

- L'écran fluorescent est remplacé par une plaque photographique

- Radioscopie à amplification de brillance

- Radioscopie qui permet de voir les battements cardiaques

39

Effets biologiques et sécurité

- Les RX peuvent causer des dégâts biologiques
 - Destruction de cellules.
 - Perte de la possibilité de se diviser pour certaines cellules.
 - Les cellules peuvent se diviser d'une manière incontrôlée.
- Dose absorbée: radiation mesurée en Gray (Gy)
 - Définie comme l'énergie ΔE déposée par radiations ionisantes par unité de masse du matériau Δm .
 - $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/Kg}$
 - Chaque organe a une dose spécifique.
 - 1 Gy signifie que $6.2 \times 10^{18} \text{ eV}$ d'énergie ont été absorbée par 1 Kg de tissu .

$$1 \text{ J} = 6.2 \times 10^{18} \text{ eV}$$

40

- Facteur de pondération des radiations
 - Prendre en compte les différences des effets biologiques des différentes radiations.
- Dose équivalente
 - Dose absorbée multipliée par le facteur de pondération.
 - Unité: le Sievert (Sv)

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J kg}^{-1} \text{ tissue} \times \text{constant}$$

$$\text{dose in Sv} = \text{dose in Gy} \times \text{constant}$$

41

Effets biologiques: irradiation

Sources d'irradiation naturelle:

- Irradiation cosmique: ~0,35 mSv / an au niveau du sol.
- Irradiation terrestre des éléments naturellement radioactifs (uranium, radium, ...): ~ 0,4 mSv / an.
- Irradiation interne, d'origine alimentaire ou respiratoire (ex. C14 créés par le rayonnement cosmique sur azote ou Argon de l'air): ~0,2 mSv.

Irradiation naturelle vs. Irradiation médicale

- Dose naturelle totale en France = ~[1,2 - 2] mSv / an (0,003/ jour). (La dose totale peut être 5 à 10 fois plus importante en certains endroits en France).
- Irradiation d'un examen médical: la dose aux ovaires lors d'un examen pulmonaire vaut 0,03 mSv.

⇒ 10 jours d'irradiation naturelle dans une région peu irradiante.

Doses d'irradiations

Source of Radiation	Dose
<i>Average Annual Dose</i>	
Natural radioactivity in air	0.80 mSv / year
Natural radioactivity in buildings and ground ,	0.40 mSv/year
Cosmic rays	0.30 mSv /year
Food and Drink	0.37 mSv/year
Nuclear Testing	0.01 mSv/year
Nuclear power	0.002mSv/year
Medical sources	0.25 mSv/year
Total from all sources	2.14 mSv/year
Legal Dose Limits for Radiation Workers	
Whole body	50 mSv/year
Foetus	1 mSv

Moyenne en France = 0,5 à 1 mSv / an.

43

Doses d'irradiations

Table 4.5 Doses for some common radiological examinations

Poitrine (seins)	Examination	Dose (mGy)
	CC Breast	1.2
	AP Chest	0.3
Colonne vertébrale	AP Lumbar spine	9.2
Bassin	AP Pelvis	6.6
Crâne	AP Skull	4.4

CC = Cranio-caudal view or projection
AP = Anterio-posterior view or projection

44

- **Radiographie: points importants**

- Les RX sont des rayonnements EM de **forte énergie** capable de **traverser** la **matière** de manière **inéga**le en fonction des milieux.
- Plus l'épaisseur et la densité du corps traversé sont importantes, plus le RX est atténué.
- Les RX sont des rayonnements ionisants.
- Les RX sont produits par l'interaction des électrons lancés à grande vitesse sur une cible métallique.
- L'image radiographique résulte de la différence d'atténuation des RX dans les milieux traversés.

45

- **Radiographie conventionnelle: bilan**

- Information anatomique
- Des précautions doivent être prises pour:
 - Le patient (dose et région exposée bien définies).
 - Le radiographe (mesure et contrôle des doses subies).
- Représente 70% des actes d'imagerie
- La 3^{ème} dimension de l'espace est perdue :
image = projection 2D de structures 3D

46

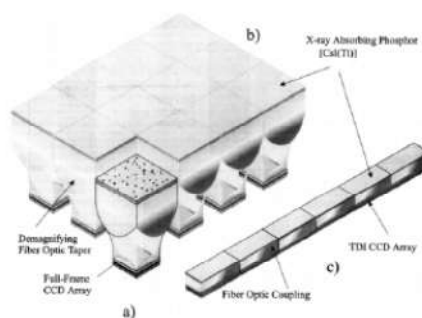
- **Avantages:**
 - Technique d'imagerie relativement pas chère.
 - Très bonne technique pour les os.
 - Faible dose de rayonnement comparé au scanner X.
- **Inconvénients**
 - Rayonnement ionisant (radiation).
 - Pas applicable sur des tissus mous.
 - Nécessité d'un très grand voltage et création de beaucoup de chaleur dans les tubes à RX.

47

Radiographie numérique

Système de radiographie numérique

- Une couche de matériau de scintillation (CsI).
- Une camera CCD convertit le signal optique des photons en signal numérique.
- Système avec meilleure élimination des rayons diffusés mais plus lent.



Revolution™ Flat Panel Digital Detector de GE Medical Systems: